

№ 12 (90) ▪ 2019  
Часть 1 ▪ Декабрь

---

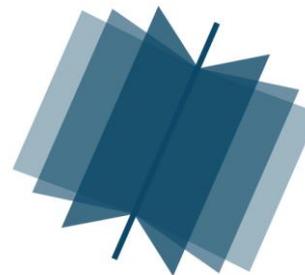
**МЕЖДУНАРОДНЫЙ  
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ЖУРНАЛ**

***INTERNATIONAL RESEARCH JOURNAL***

---

**ISSN 2303-9868 PRINT  
ISSN 2227-6017 ONLINE**

Екатеринбург  
2019



Периодический теоретический и научно-практический журнал.  
Выходит 12 раз в год.  
Учредитель журнала: Соколова М.В.  
Главный редактор: Меньшаков А.И.  
Адрес издателя и редакции: 620137, г. Екатеринбург, ул.  
Академическая, д. 11, корп. А, оф. 4.  
Электронная почта: [editors@research-journal.org](mailto:editors@research-journal.org)  
Сайт: [www.research-journal.org](http://www.research-journal.org)  
16+

**№ 12 (90) 2019  
Часть 1  
Декабрь**

---

Дата выхода 18.12.2019  
Подписано в печать 13.12.2019  
Тираж 200 экз.  
Цена: бесплатно.  
Заказ 295825.  
Отпечатано с готового оригинал-макета.  
Отпечатано в типографии "А-принт".  
620049, г. Екатеринбург, пер. Лобачевского, д. 1.

Журнал имеет свободный доступ, это означает, что статьи можно читать, загружать, копировать, распространять, печатать и ссылаться на их полные тексты с указанием авторства без каких-либо ограничений. Тип лицензии CC поддерживаемый журналом: Attribution 4.0 International (CC BY 4.0). Актуальная информация об индексации журнала в библиографических базах данных <https://research-journal.org/indexing/>.

Номер свидетельства о регистрации в Федеральной Службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций: **ПИ № ФС 77 – 51217**.

#### **Члены редколлегии:**

##### **Филологические науки:**

*Растягаев А.В.* д-р филол. наук, Московский Городской Университет (Москва, Россия);  
*Сложеникина Ю.В.* д-р филол. наук, Московский Городской Университет (Москва, Россия);  
*Штрекер Н.Ю.* к.филол.н., Калужский Государственный Университет имени К.Э. Циолковского (Калуга, Россия);  
*Вербицкая О.М.* к.филол.н., Иркутский Государственный Университет (Иркутск, Россия).

##### **Технические науки:**

*Пачурин Г.В.* д-р техн. наук, проф., Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (Нижегород, Россия);  
*Федорова Е.А.* д-р техн. наук, проф., Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет (Нижегород, Россия);  
*Герасимова Л.Г.* д-р техн. наук, Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева (Апатиты, Россия);  
*Курасов В.С.* д-р техн. наук, проф., Кубанский государственный аграрный университет (Краснодар, Россия);  
*Оськин С.В.* д-р техн. наук, проф. Кубанский государственный аграрный университет (Краснодар, Россия).

##### **Педагогические науки:**

*Куликовская И.Э.* д-р пед. наук, Южный федеральный университет (Ростов-на-Дону, Россия);  
*Сайкина Е.Г.* д-р пед. наук, Российский государственный педагогический университет имени А.И. Герцена (Санкт-Петербург, Россия);  
*Лукьянова М.И.* д-р пед. наук, Ульяновский государственный педагогический университет им. И.Н. Ульянова (Ульяновск, Россия);  
*Ходакова Н.П.* д-р пед. наук, проф., Московский городской педагогический университет (Москва, Россия).

##### **Психологические науки:**

*Розенова М.И.* д-р психол. наук, проф., Московский государственный психолого-педагогический университет (Москва, Россия);  
*Ивков Н.Н.* д-р психол. наук, Российская академия образования (Москва, Россия);  
*Каменская В.Г.* д-р психол. наук, к. биол. наук, Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина (Елец, Россия).

##### **Физико-математические науки:**

*Шамолин М.В.* д-р физ.-мат. наук, МГУ им. М. В. Ломоносова (Москва, Россия);  
*Глезер А.М.* д-р физ.-мат. наук, Государственный Научный Центр ЦНИИчермет им. И.П. Бардина (Москва, Россия);  
*Свиштунов Ю.А.* д-р физ.-мат. наук, проф., Санкт-Петербургский государственный университет (Санкт-Петербург, Россия).

##### **Географические науки:**

*Умывакин В.М.* д-р геогр. наук, к.техн.н. проф., Военный авиационный инженерный университет (Воронеж, Россия);  
*Брылеев В.А.* д-р геогр. наук, проф., Волгоградский государственный социально-педагогический университет (Волгоград, Россия);  
*Огуреева Г.Н.* д-р геогр. наук, проф., МГУ имени М.В. Ломоносова (Москва, Россия).

##### **Биологические науки:**

*Буланый Ю.П.* д-р биол. наук, Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского (Саратов, Россия);  
*Аникин В.В.*, д-р биол. наук, проф., Саратовский государственный университет им. Н.Г.Чернышевского (Саратов, Россия);  
*Еськов Е.К.* д-р биол. наук, проф., Российский государственный аграрный заочный университет (Балашиха, Россия);  
*Шеуджен А.Х.* д-р биол. наук, проф., Кубанский государственный аграрный университет (Краснодар, Россия);  
*Ларионов М.В.* д-р биол. наук, профессор, Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского (Саратов, Россия).

**Архитектура:**

*Янковская Ю.С.* д-р архитектуры, проф., Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (Санкт-Петербург, Россия).

**Ветеринарные науки:**

*Алиев А.С.* д-р ветеринар. наук, проф., Санкт-Петербургская государственная академия ветеринарной медицины (Санкт-Петербург, Россия);  
*Татарникова Н.А.* д-р ветеринар. наук, проф., Пермская государственная сельскохозяйственная академия имени академика Д.Н. Прянишникова (Пермь, Россия).

**Медицинские науки:**

*Никольский В.И.* д-р мед. наук, проф., Пензенский государственный университет (Пенза, Россия);  
*Ураков А.Л.* д-р мед. наук, Ижевская Государственная Медицинская Академия (Ижевск, Россия).

**Исторические науки:**

*Меерович М.Г.* д-р ист. наук, к. архитектуры, проф., Иркутский национальный исследовательский технический университет (Иркутск, Россия);  
*Бакулин В.И.* д-р ист. наук, проф., Вятский государственный университет (Киров, Россия);  
*Бердинских В.А.* д-р ист. наук, Вятский государственный гуманитарный университет (Киров, Россия);  
*Лёвочкина Н.А.* к.ист.наук, к.экон.н. ОмГУ им. Ф.М. Достоевского (Омск, Россия).

**Культурология:**

*Куценков П.А.* д-р культурологии, к.искусствоведения, Институт востоковедения РАН (Москва, Россия).

**Искусствоведение:**

*Куценков П.А.* д-р культурологии, к.искусствоведения, Институт востоковедения РАН (Москва, Россия).

**Философские науки:**

*Петров М.А.* д-р филос. наук, Института философии РАН (Москва, Россия);  
*Бессонов А.В.* д-р филос. наук, проф., Институт философии и права СО РАН (Новосибирск, Россия);  
*Цыганков П.А.* д-р филос. наук., МГУ имени М.В. Ломоносова (Москва, Россия);  
*Лойко О.Т.* д-р филос. наук, Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Томск, Россия).

**Юридические науки:**

*Костенко Р.В.* д-р юрид. наук, проф., Кубанский государственный аграрный университет (Краснодар, Россия);  
*Мазуренко А.П.* д-р юрид. наук, Северо-Кавказский федеральный университет г. Пятигорске (Пятигорск, Россия);  
*Мещерякова О.М.* д-р юрид. наук, Всероссийская академия внешней торговли (Москва, Россия);  
*Ергашев Е.Р.* д-р юрид. наук, проф., Уральский государственный юридический университет (Екатеринбург, Россия).

**Сельскохозяйственные науки:**

*Важов В.М.* д-р с.-х. наук, проф., Алтайский государственный гуманитарно-педагогический университет им. В.М. Шукшина (Бийск, Россия);  
*Раков А.Ю.* д-р с.-х. наук, Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр (Михайловск, Россия);  
*Комлацкий В.И.* д-р с.-х. наук, проф., Кубанский государственный аграрный университет (Краснодар, Россия);  
*Никитин В.В.* д-р с.-х. наук, Белгородский научно-исследовательский институт сельского хозяйства (Белгород, Россия);  
*Наумкин В.П.* д-р с.-х. наук, проф., Орловский государственный аграрный университет.

**Социологические науки:**

*Замараева З.П.* д-р социол. наук, проф., Пермский государственный национальный исследовательский университет (Пермь, Россия);  
*Солодова Г.С.* д-р социол. наук, проф., Институт философии и права СО РАН (Новосибирск, Россия);  
*Кораблева Г.Б.* д-р социол. наук, Уральский Федеральный Университет (Екатеринбург, Россия).

**Химические науки:**

*Абдиев К.Ж.* д-р хим. наук, проф., Казахстанско-Британский технический университет (Алма-Аты, Казахстан);  
*Мельдешов А.* д-р хим. наук, Казахстанско-Британский технический университет (Алма-Аты, Казахстан);  
*Скачилова С.Я.* д-р хим. наук, Всероссийский Научный Центр По Безопасности Биологически Активных Веществ (Купавна Старая, Россия).

**Науки о Земле:**

*Горяинов П.М.* д-р геол.-минерал. наук, проф., Геологический институт Кольского научного центра Российской академии наук (Апатиты, Россия).

**Экономические науки:**

*Бурда А.Г.* д-р экон. наук, проф., Кубанский Государственный Аграрный Университет (Краснодар, Россия);  
*Лёвочкина Н.А.* д-р экон. наук, к.ист.н., ОмГУ им. Ф.М. Достоевского (Омск, Россия);  
*Ламоттке М.Н.* к.экон.н., Нижегородский институт управления (Нижний Новгород, Россия);  
*Акбулаев Н.* к.экон.н., Азербайджанский государственный экономический университет (Баку, Азербайджан);  
*Кулиев О.* к.экон.н., Азербайджанский государственный экономический университет (Баку, Азербайджан).

**Политические науки:**

*Завершинский К.Ф.* д-р полит. наук, проф. Санкт-Петербургский государственный университет (Санкт-Петербург, Россия).

**Фармацевтические науки:**

*Тринеева О.В.* к.фарм.н., Воронежский государственный университет (Воронеж, Россия);  
*Кайшева Н.Ш.* д-р фарм. наук, Волгоградский государственный медицинский университет (Волгоград, Россия);  
*Ерофеева Л.Н.* д-р фарм. наук, проф., Курский государственный медицинский университет (Курс, Россия);  
*Папанов С.И.* д-р фарм. наук, Медицинский университет (Пловдив, Болгария);  
*Петкова Е.Г.* д-р фарм. наук, Медицинский университет (Пловдив, Болгария);  
*Скачилова С.Я.* д-р хим. наук, Всероссийский Научный Центр По Безопасности Биологически Активных Веществ (Купавна Старая, Россия);  
*Ураков А.Л.* д-р мед. наук, Государственная Медицинская Академия (Ижевск, Россия).

# ОГЛАВЛЕНИЕ

---

## ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ / PHYSICS AND MATHEMATICS

---

Алыбаев К.С., Нарымбетов Т.К. АНАЛИТИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ КОМПЛЕКСНОГО ПЕРЕМЕННОГО С ПАРАМЕТРАМИ .....	6
Зилитис В.А. ВЫЧИСЛЕНИЕ ПО МЕТОДУ ДИРАКА-ФОКА СЕЧЕНИЙ ФОТОИОНИЗАЦИИ ДЛЯ ИОНОВ ИЗОЭЛЕКТРОННОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ЦЕЗИЯ .....	13
Кильдибаева С.Р. АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО ЛАГРАНЖЕВОГО МЕТОДА ДЛЯ ОПИСАНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ ГЛУБОКОВОДНОГО ИСТЕЧЕНИЯ НЕФТЕПРОДУКТОВ ПРИ ПОВРЕЖДЕНИЯХ МОРСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ .....	17
Кораблев Г.А. О МЕХАНИЗМЕ ПРОЦЕССОВ ТЯГОТЕНИЯ .....	21
Носов А.П., Дубинин С.С., Осотов В.И. ОСОБЕННОСТИ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ БУФЕРНЫХ СЛОЕВ $\text{CeO}_2$ НА $r\text{-Al}_2\text{O}_3$ ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ОСАЖДЕНИЯ.....	26

---

## ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ / ENGINEERING

---

Савостьянов А.В., Московских Д.О., Логинов П.А., Воротыло С., Бардасова К.В. ИСКРОВОЕ ПЛАЗМЕННОЕ СПЕКАНИЕ МЕДНО-АЛМАЗНЫХ КОМПОЗИТОВ: ВЛИЯНИЕ МОРФОЛОГИИ ПОКРЫТИЯ $\text{V}_4\text{C}$ НА ПОВЕРХНОСТИ АЛМАЗОВ.....	30
Гаджиева Т.А. ПРИМЕНЕНИЕ ГЛОБАЛЬНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ В МЕДИЦИНЕ .....	35
Головин В.А., Ильин А.Б., Алиев А.Д. ВЛИЯНИЕ ТИПА ОТВЕРДИТЕЛЯ И МОДИФИКАТОРОВ НА КИСЛОТОПРОНИЦАЕМОСТЬ ЭПОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ .....	38
Долганов Д.О., Манохин П.Е. УПРАВЛЕНИЕ ТРУДОВЫМИ РЕСУРСАМИ СТРОИТЕЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ .....	45
Пономарев Д.А., Кузьмина Т.О. СИСТЕМА РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ.....	51
Куликова П.А., Панайтова Ю.А. СОВРЕМЕННЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ОРГАНУ ПО АККРЕДИТАЦИИ, АККРЕДИТУЮЩЕМУ ОРГАНЫ ПО ОЦЕНКЕ СООТВЕТСТВИЯ .....	60
Ильина М.Е., Курочкин И.Н. РАЗРАБОТКА ПОЛИМЕРНОЙ КОМПОЗИЦИИ Пониженной ГОРЮЧЕСТИ НА ОСНОВЕ ПЛАСТИФИЦИРОВАННОГО ПОЛИВИНИЛХЛОРИДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ШЛАМОВОГО ОТХОДА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА .....	65
Баншева Л.М., Львова Л.А. МИКРОКЛИМАТ КУЛЬТИВАЦИОННЫХ СООРУЖЕНИЙ (ТЕПЛИЦ) В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА.....	69
Миличенкова Ю.В. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ГРУЗОВОГО ТРАНСПОРТА В МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕГО МОДЕРНИЗАЦИИ .....	74
Палкин Г.А., Суворов И.Ф. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПЕРВОГО ПОДЪЕМА НА ПРИМЕРЕ СИСТЕМЫ ВОДОСНАБЖЕНИЯ ПГТ. НОВООРОЛОВСК ЗАБАЙКАЛЬСКОГО КРАЯ .....	78
Виткалова И.А., Торлова А.С., Пикалов Е.С. ПРИМЕНЕНИЕ ТРЕПЕЛА В ПРОИЗВОДСТВЕ ФАСАДНОЙ КЕРАМИКИ, ПОЛУЧАЕМОЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТЕКЛОБОЯ .....	83
Ахметшин Р.С., Пичугин П.И. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТРУБЧАТЫХ ПРОВОДНИКОВ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В ЛЭП .....	87
Ревазов Х.Ю., Команов П.А., Тавасиев Д.А., Семиков В.С. ИССЛЕДОВАНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ БЕСКОНТАКТНЫХ ПЛАТЕЖЕЙ .....	93
Сотников Д.Н., Котловцева Е.Ю., Корнеев П.С. ОСНОВНЫЕ ПРИСПОСОБЛЕНИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СБОРКИ – СВАРКИ БАКОВ .....	96
Медведев П.В., Федотов В.А., Владимиров Н.П. ВЛИЯНИЕ ГЕНОТИПИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ЗЕРНА ПШЕНИЦЫ НА СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРОДУКТОВ ЕГО РАЗМОЛА .....	104

<b>Хачикян П.П.</b> <b>ПРОБЛЕМАТИКА ОБЕСПЕЧЕНИЯ АВИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ТЕРРОРИСТИЧЕСКИХ УГРОЗАХ.....</b>	<b>109</b>
<b>Черный С.А., Шестаков А.В.</b> <b>ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ КОГНИТИВНЫХ СТРУКТУР .....</b>	<b>114</b>
<b>НАУКИ О ЗЕМЛЕ / SCIENCE ABOUT THE EARTH</b>	
<b>Елсукова Е.Ю., Опекунова М.Г., Опекунов А.Ю.</b> <b>ТЕХНОГЕННАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ПОТОКОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ПОЧВАХ В ЗОНЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ МЕДНО-НИКЕЛЕВОГО ПРОИЗВОДСТВА.....</b>	<b>118</b>
<b>Пархоменко В.П.</b> <b>ГЛОБАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ КЛИМАТА С УЧЁТОМ УГЛЕРОДНОГО ЦИКЛА НАЗЕМНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ.....</b>	<b>125</b>
<b>Рыбак О.О.</b> <b>ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ОСЕВЫХ ЛИНИЙ ГОРНЫХ ЛЕДНИКОВ .....</b>	<b>129</b>
<b>Рыбак О.О., Рыбак Е.А., Корнева И.А.</b> <b>ОЖИДАЕМОЕ ИЗМЕНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО БАЛАНСА МАССЫ ЛЕДНИКОВОГО КОМПЛЕКСА ЭЛЬБРУСА В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ .....</b>	<b>135</b>
<b>ГЕОЛОГО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ / GEOLOGY AND MINERALOGY</b>	
<b>Наумов В.А., Фиоруччи А., Брюхов В.Н., Голдырев В.В., Мовзитова К.И., Фетисов В.В.</b> <b>ТЕХНОГЕННО-МИНЕРАЛЬНЫЕ ОБРАЗОВАНИЯ И ВОДЫ НЕКОТОРЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СЕВЕРНОЙ ИТАЛИИ.....</b>	<b>142</b>
<b>Остапенко Н.С., Нерода О.Н.</b> <b>НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗОЛОТА ХАКАНДЖА, МНОГОВЕРШИННОЕ И БЕЛАЯ ГОРА (РОССИЯ) .....</b>	<b>148</b>
<b>Романова Т.И., Самарин В.А.</b> <b>ОСОБЕННОСТИ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ РЕК И ОЗЕР ХМАО-ЮГРЫ .....</b>	<b>154</b>
<b>Шарова Т.В.</b> <b>ЗОЛОТОЕ ОРУДЕНЕНИЕ В ДОКЕМБРИЙСКИХ МЕТАМОРФИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ ЦЕНТРАЛЬНОГО АЛДАНА.....</b>	<b>164</b>
<b>БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ / BIOLOGY</b>	
<b>Брянин С.В. Кондратова А.В.</b> <b>ФУНКЦИИ ПОСТПИРОГЕННОГО УГЛЯ В ПОЧВАХ БОРЕАЛЬНЫХ ЛЕСОВ ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА.....</b>	<b>169</b>
<b>Беляева В., Ермолова М., Новиков Н., Гуткин Б., Феурра М., Феделе Т.</b> <b>ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ КОРРЕЛЯЦИИ АМПЛИТУДЫ АЛЬФА КОЛЕБАНИЙ ПРЕДСКАЗЫВАЮТ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОЧЕЙ ПАМЯТИ.....</b>	<b>174</b>
<b>Кашаева Г.Г., Якупова В.В., Лебедева М.В.</b> <b>ПАПОРОТНИКООБРАЗНЫЕ КОЛЛЕКЦИИ ОРАНЖЕРЕИ ЮУБСИ УФИЦ РАН.....</b>	<b>179</b>
<b>Полохин О.В.</b> <b>МОРФОЛОГО-ГЕНЕТИЧЕСКАЯ СПЕЦИФИКА ПОЧВ ОСТРОВА УРУП.....</b>	<b>186</b>
<b>Сидоренко М.Л., Слепцова Н.А., Немченко Ю.К.</b> <b>ПСИХРОТРОФНЫЕ МИКРООРГАНИЗМЫ ПОЧВ ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА.....</b>	<b>190</b>
<b>ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ / CHEMISTRY</b>	
<b>Нгуен Тхи Линь, Нго Тхань Хай, Ву Ван Тоан, Ле Динь Чиен</b> <b>ХИМИЧЕСКАЯ МОДИФИКАЦИЯ АМИНОПОЛИСАХАРИДА ИЗ ПАНЦИРЯ КРЕВЕТОК ПРЯМЫМ СОЕДИНЕНИЕМ С ПОЛИАНИЛИНОМ.....</b>	<b>194</b>
<b>Федорова Н.Е., Мухина Л.П.</b> <b>МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОЛЕЙ ДИПИРИДИЛИЯ В ПРОДУКЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА И РАСТЕНИЕВОДСТВА .....</b>	<b>201</b>
<b>Ярышева Л.М., Ярышева А.Ю., Волынский А.Л.</b> <b>ФОРМИРОВАНИЕ РЕЛЬЕФА НА ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИЭТИЛЕНА ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ С ЖЕСТКИМИ ПОКРЫТИЯМИ.....</b>	<b>206</b>

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.90.12.002>

## АНАЛИТИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ КОМПЛЕКСНОГО ПЕРЕМЕННОГО С ПАРАМЕТРАМИ

Научная статья

Алыбаев К.С.<sup>1,\*</sup>, Нарымбетов Т.К.<sup>2</sup><sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-7962-534X;<sup>2</sup> ORCID: 0000-0003-0921-4542;<sup>1,2</sup> Жалал-Абадский государственный университет, Жалал-Абад, Киргизская Республика

\* Корреспондирующий автор (alybaevkurmanbek[at]rambler.ru)

**Аннотация**

В данной работе рассматриваются аналитические функции комплексного переменного с малыми параметрами порождаемые некоторыми операторами. Исследуется асимптотическое поведение функции, по малому параметру. Задача решена с использованием линии уровня гармонических функции. Область аналитичности функции разделяется некоторыми линиями на части и в некоторых частях пределы (по малому параметру) существуют, а в других бесконечны или не существуют.

**Ключевые слова:** Аналитические функции; отображения пространств; линии уровня; параметры; пути интегрирования.

## ANALYTICAL FUNCTIONS OF AN COMPLEX VARIABLE WITH PARAMETERS

Research article

Alybaev K.S.<sup>1,\*</sup>, Narymbetov T.K.<sup>2</sup><sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-7962-534X;<sup>2</sup> ORCID: 0000-0003-0921-4542;<sup>1,2</sup> Jalal-Abad State University, Jalal-Abad, Kyrgyz Republic

\* Corresponding author (alybaevkurmanbek[at]rambler.ru)

**Abstract**

In this paper, we consider the analytic functions of a complex variable with small parameters generated by some operators. We study the asymptotic behavior of a function with respect to a small parameter. The problem is solved using line-level harmonic functions. The analytic domain of the function is divided by some lines into parts, and in some parts the limits (by a small parameter) exist, but in others they are infinite or do not exist.

**Keywords:** analytical functions; display spaces; level lines; options; integration paths.

**Введение**

Теория функций комплексного переменного имеют многочисленные приложения для решения задач гидроаэродинамики, теории упругости, электростатистики, магнитных и тепловых полей и т.д. [1], [2], [3]. Следовательно развитие теории функций комплексного переменного для разработки новых методов решения различных математических и практических задач является актуальной.

**Обозначения и вспомогательные понятия**

- $N, R, C$  – соответственно множество натуральных, действительных и комплексных чисел;
- $t = t_1 + it_2$  – комплексная переменная, где  $t_1, t_2$  – действительные переменные;  $i = \sqrt{-1}$ ;
- $\varepsilon$  – малый положительный вещественный параметр, если функция зависит от  $\varepsilon$ , “по  $\varepsilon$ ” будет обозначать  $\varepsilon \rightarrow 0$ ;
- $a(t) = a_1(t_1, t_2) + ia_2(t_1, t_2)$  – комплекснозначная функция комплексной переменной, где  $a_k(t_1, t_2)$  ( $k = 1, 2$ ) – вещественнозначные функции двух вещественных переменных;
- $D \subset C$  – односвязная область в том смысле, что две любые ее точки можно соединить спрямляемой кривой;
- $Q(D)$  – пространство аналитических комплекснозначных функций в  $D$ ;
- $Q_\varepsilon(D)$  – пространство аналитических комплекснозначных функций в  $D$  с параметром  $\varepsilon$ ;
- Множество  $(p_k) = \{t \in D \mid a_k(t_1, t_2) = p_k - const\}$  называется линией уровня функции  $a_k(t_1, t_2)$  (1,2) в области  $D$ ;
- $\forall t \in D(a(t) \in P)$  – означает: для любого  $t$  из  $D$  функция  $a(t)$  обладает свойством  $P$ .

**Постановка задачи**

Рассмотрим пространство  $Q_\varepsilon(D)$ . Пусть  $z(t, \varepsilon) \in Q_\varepsilon(D)$ .

Определение 1. Если для любого  $\varepsilon_0 > 0$  найдется  $\delta = \delta(\varepsilon_0)$  такое, что при  $\varepsilon < \delta$  для всех  $t \in D$  (или на кривой  $(p)$ ) имеет место неравенство

$$|z(t, \varepsilon) - b(t)| < \varepsilon_0$$

то будем говорить, что  $z(t, \varepsilon)$  стремится при  $\varepsilon \rightarrow 0$  к функции  $b(t)$  равномерно относительно  $t$  в области  $D$  (или на кривой  $c$ ).

Далее согласно принятого определения исследуем задачу  $\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} z(t, \varepsilon)$ . В частности к таким задачам сводятся исследование асимптотического поведения решений сингулярно возмущенных обыкновенных дифференциальных уравнений или систем в комплексных областях.

Решение поставленной задачи для произвольной функции комплексной переменной практически является неразрешимой. Ограничимся рассмотрением некоторых аналитических функций комплексного переменного.

Пусть заданы пространства  $Q(D)$ ,  $Q_\varepsilon(D)$  и оператор  $I_\varepsilon$  переводящий элемент пространства  $Q(D)$  в элемент пространства  $Q_\varepsilon(D)$ .

Если  $a(t) \in Q(D)$ , то  $I_\varepsilon a(t) = z(t, \varepsilon) \in Q_\varepsilon(D)$ .

**Представление аналитических функций на линиях**

Справедливо утверждение: Гармонические функции принимают каждое свое значение на некоторых линиях (линиях уровня) и совпадают с постоянными на линиях будучи торжественно не равными постоянной.

Пусть  $z(t) \in Q(D)$  и  $(p) = \{t \in D | \text{Re}z(t) = p - \text{const}\}$ .

Рассмотрим  $z(t)$  на  $(p)$ .

Поскольку  $z(t) \in Q(D) \wedge (p) \subset D$ , то и  $z(t) \in Q(p)$ .

Функция  $z(t)$  в целом на линии  $(p)$  представляется в виде

$z(t) = \text{Re}z(t) + i\text{Im}z(t)$ , причем в каждой точке  $t \in (p)$  функция  $\text{Re}z(t)$  принимает значение  $p$  согласно утверждения. Выражение  $z(t) = p + i\text{Im}z(t)$  означает значение функции  $z(t)$  в некоторой точке  $t \in (p)$ .

В наших дальнейших исследованиях при рассмотрении аналитических функций на линиях будем учитывать такие представления.

**Решения задачи для некоторых операторов**

Пусть  $a(t) \in Q(D)$  – скалярная функция.

1. Определим оператор  $I_\varepsilon(a(t)) = z_1(t, \varepsilon) = \exp \frac{a(t)}{\varepsilon}$ . Пусть  $t_0 \in D$  и её внутренняя точка, и выполняется следующее условие:

U1.  $a(t_0) = 0$  и  $\forall t \in D (a'(t) \neq 0)$ .

Из условия U1 вытекает, функция  $a(t)$  в области  $D$  не имеет кратных точек и  $t_0$  является простым нулем функции  $a(t)$  [1,2,3].

Область  $D$  полностью покрывается взаимно ортогональными линиями уровней функций  $a_k(t_1, t_2) (k = 1, 2)$ .

Для внесения ясности в топологию области  $D$  в терминах линии уровня введем в рассмотрение линию  $(p_{10} = 0) = \{t \in D | a_1(t_1, t_2) = 0\}$ . В силу условия U1 такая линия существует. Линия  $(p_{10})$  проходит через точку  $t_0$  и область  $D$  делит на части  $D_1, D_2$  где выполняются соотношения

$\forall t \in D_1 (a_1(t_1, t_2) \leq 0 \vee a_1(t_1, t_2) \geq 0)$  и  $t \in D_2 (a_1(t_1, t_2) \geq 0 \vee a_1(t_1, t_2) \leq 0)$  причем выполнения  $a_1(t_1, t_2) \leq 0 (\geq 0)$  одновременно в двух областях исключается. Для определенности возьмём

$\forall t \in D_1 (a_1(t_1, t_2) \leq 0) \wedge \forall t \in D_2 (a_2(t_1, t_2) \geq 0)$ , причем равенства имеет место только на линии  $(p_{10})$ .

Рассмотрим следующие случаи:

1. Пусть  $t$  произвольная точка принадлежащая  $(p_{10})$ . Рассмотрим функцию

$$z_1(t, \varepsilon) = \exp \frac{a_1(t_1, t_2) + ia_2(t_1, t_2)}{\varepsilon}$$

Функция  $a_1(t_1, t_2)$  принимает значение 0.

Отсюда вытекает для функции  $z_1(t, \varepsilon)$  в рассматриваемой точке  $\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} z_1(t, \varepsilon)$  не существует, но она ограничена по модулю. Точка  $t$  произвольная из  $(p_{10})$ , тогда  $\forall t \in (p_{10})$  предел  $\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} z_1(t, \varepsilon)$  не существует, но она ограничена по модулю.

2.  $t \in D_1$ . Введем на рассмотрение линию

$$(p_{1\varepsilon}^-) = \{t \in D_1 | a_1(t_1, t_2) = \varepsilon \ln \varepsilon\}$$

и область, ограниченную линиями  $(p_{10}), (p_{1\varepsilon}^-)$  обозначим  $D_{1\varepsilon}$ , а оставшуюся часть  $D_1$  обозначим  $D_{11}$ . Линию  $(p_{1\varepsilon}^-)$  отнесем к области  $D_{11}$ .

Если  $t \in (D_{1\varepsilon})$ , то  $\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} z_1(t, \varepsilon)$  не существует, но  $|z_1(t, \varepsilon)| \leq 1$ .

Если  $t \in (p_{1\varepsilon}^-)$ , то  $z_1(t, \varepsilon) = \exp \frac{1}{\varepsilon} (a_1(t_1, t_2) + ia_2(t_1, t_2))$  причем

$a_1(t_1, t_2) = \varepsilon \ln \varepsilon$ . Отсюда для  $t \in (p_{1\varepsilon}^-)$  имеем  $z_1(t, \varepsilon) \rightarrow 0$  по  $\varepsilon$ .

Далее  $\forall t \in D_{11} (z_1(t, \varepsilon) \rightarrow 0$  по  $\varepsilon)$ .

3.  $t \in D_2$ . Рассмотрим линии

$$(p_{1\varepsilon}^+) = \{t \in D_2 | a_1(t_1, t_2) = -\varepsilon \ln \varepsilon\}$$

Область ограниченную линиями  $(p_{10}), (p_{1\varepsilon}^+)$  обозначим  $D_{2\varepsilon}$ , а оставшуюся часть  $D_2$  обозначим  $D_{21}$ . Линию  $(p_{1\varepsilon}^+)$  отнесем к области  $D_{21}$ . Далее, если  $t \in D_{2\varepsilon}$ , то  $\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} z_1(t, \varepsilon)$  не существует, но по мере приближения  $t$  к линии  $(p_{1\varepsilon}^+)$  модуль  $|z_1(t, \varepsilon)|$  растет по  $\varepsilon$ , а для  $t \in (p_{1\varepsilon}^+)$  и  $D_{21}$  имеем  $z_1(t, \varepsilon) \rightarrow \infty$  по  $\varepsilon$ .

Примечание. Если условие U заменить на следующее.

$$U^* 1. a(t_0) = 0, a'(t_0), \dots, a^{(n-1)}(t_0) = 0, a^{(n)}(t_0) \neq 0$$

$$\forall t \in D \wedge t \neq t_0 (a(t) \neq 0),$$

то линия  $(p_{10})$  в точке  $t_0$  разветвляется и область  $D$  разделяет на  $2n$  частей, причем ровно в  $2n$  областях (содержащие ветви  $(p_{10})$ ) предел  $z(t, \varepsilon)$  по  $\varepsilon$  не существует, а в  $n$  областях  $z_1(t, \varepsilon) \rightarrow 0$  или  $z_1(t, \varepsilon) \rightarrow \infty$  по  $\varepsilon$ . Такие области чередуются. К примеру  $a(t) = t^n, n \in N$ .

II. Пусть

$$z_2(t, \varepsilon) = I_\varepsilon(a(t), b(t)) = \frac{1}{\varepsilon} \int_{t_0}^t b(\tau) \exp \frac{a(t) - a(\tau)}{\varepsilon} d\tau \quad (1)$$

Пусть выполняются условия:

U2.  $a(t) \in Q(D) \wedge b(t) \in Q(D)$  ;

U3.  $a(t_0) = 0$  и  $\forall t \in D (a'(t) \neq 0)$ .

Согласно U2  $z_2(t, \varepsilon) \in Q_\varepsilon(D)$ .

Как и в предыдущем случае определим линию  $(p_{10})$  и области  $D_1, D_2$ .

Для исследования функции  $z_2(t, \varepsilon)$  по  $\varepsilon$  определим пути интегрирования. Согласно U2 функция  $z_2(t, \varepsilon) \in Q_\varepsilon(D)$ . Следовательно пути интегрирования можно выбрать произвольными, но полностью принадлежащими  $D$ . Если  $t \in (p_{10})$ , то путь состоит из части  $(p_{10})$  соединяющую точки  $t_0$  и  $t \in (p_{10})$ .

Если  $t \in D_1$  или  $D_2$ , то путь состоит из части  $(p_{10})$  соединяющую точки  $t_0, \tilde{t} \in (p_{10})$  и части линии  $(p_2) = \{t \in D \mid a_2(t_1, t_2) = p_2 - const\}$  соединяющую точки  $\tilde{t}, t \in D_1$  или  $D_2$ . Линии  $(p_{10}), (p_2)$  порождаемые гармоническими функциями,  $a_k(t_1, t_2) (k = 1, 2)$  являются аналитическими кривыми и их уравнения можно представит параметрически [1], [2], [3]. В качестве параметра возьмём длины кривых  $(p_{10}), (p_2)$ . Пусть  $\tilde{s}$  длина кривой  $(p_{10})$  отчитываемого от точки  $t_0$  до точки  $\tilde{t}$ , и  $\tilde{\tau}$  длина  $(p_2)$  от точки  $\tilde{t}$  до  $t$ . Уравнение кривой  $(p_{10})$  представим в виде

$t_1 = t_1(s), t_2 = t_2(s), 0 \leq s \leq \tilde{s} < +\infty$ , а уравнение кривой  $(p_2)$  в виде

$t_1 = t_1(\tau), t_2 = t_2(\tau), 0 \leq \tau \leq \tilde{\tau} < +\infty$ ,

где  $(t_1, t_2)$  текущие координаты точек принадлежащие кривым  $(p_{10}), (p_2)$ .

С учетом выбранных путей интегрирования и их параметрическое представление, (1) представим в виде

$$z_2(t, \varepsilon) = \frac{1}{\varepsilon} \int_0^{\tilde{s}} b(\tau(s)) \exp \frac{a(\tau(\tilde{s})) - a(\tau(s))}{\varepsilon} d\tau(s) + \frac{1}{\varepsilon} \int_0^{\tilde{\tau}} b(\tau(\sigma)) \exp \frac{a(\tau(\tilde{s})) - a(\tau(\sigma))}{\varepsilon} d\tau(\sigma). \quad (2)$$

Сначала рассмотрим случай  $t \in (p_{10})$ . Из (2) имеем

$$z_2(\tilde{t}, \varepsilon) = \frac{1}{\varepsilon} \int_0^{\tilde{s}} b(\tau(s)) \exp \frac{ilm a(\tau(\tilde{s})) - ilm a(\tau(s))}{\varepsilon} d\tau(s) \quad (3)$$

Интеграл (3) про интегрировав по частям получим

$$z_2(\tilde{t}, \varepsilon) = - \frac{b(\tau(\tilde{s}))}{(ilm a(\tau(\tilde{s})))'} + \frac{b(\tau(0))}{(ilm a(\tau(0)))'} \cdot \exp \frac{ilm a(\tau(\tilde{s})) - ilm a(\tau(0))}{\varepsilon} - \int_0^{\tilde{s}} \left[ \frac{b(\tau(s))}{(ilm a(\tau(s)))'} \right]' \exp \frac{ilm a(\tau(\tilde{s})) - ilm a(\tau(s))}{\varepsilon} d\tau(s). \quad (4)$$

В (4) интеграл в правой части имеет порядок  $\varepsilon$ . Следовательно  $z_2(\tilde{t}, \varepsilon)$  не имеет предела по  $\varepsilon$ , но ограничена по модулю.

Пусть  $t \in D_1$ . Из (2), интегралы в правой части проинтегрировав по частям, получим

$$z_2(t, \varepsilon) = - \frac{b(\tau(\tilde{s}))}{(ilm a(\tau(\tilde{s})))'} \cdot \exp \frac{1}{\varepsilon} (a(\tau(\tilde{s})) - ilm a(\tau(\tilde{s}))) + \frac{b(\tau(s=0))}{(ilm a(\tau(s=0)))'} \cdot \exp \frac{1}{\varepsilon} [a(\tau(\tilde{s})) - ilm a(\tau(s=0))] - \frac{b(\tau(\tilde{s}))}{a'(\tau(\tilde{s}))} + \frac{b(\tau(\sigma=0))}{a'(\tau(\sigma=0))} \exp \frac{a(\tau(\tilde{s})) - a(\tau(\sigma=0))}{\varepsilon} - \int_0^{\tilde{\tau}} \left[ \frac{b(\tau(\sigma))}{a'(\tau(\sigma))} \right]' \exp \frac{a(\tau(\tilde{s})) - a(\tau(\sigma))}{\varepsilon} d\tau(\sigma). \quad (5)$$

В (5)  $a(\tau(\sigma = 0)) = \text{Im } a(\tau(\tilde{s}))$ ,  $b(\tau(\sigma = 0)) = b(\tau(\tilde{s}))$ , а интеграл имеет порядок  $\varepsilon$ . Для значений  $0 \ll \tilde{\sigma}$  имеем  $\text{Re } a(\tau(\tilde{\sigma})) \ll 0$ . Тогда

$$z(t, \varepsilon) \rightarrow -\frac{b(\tau(\tilde{\sigma}))}{a'(\tau(\tilde{\sigma}))} = -\frac{b(t)}{a'(t)} \quad (6)$$

Пусть  $t \in D_2$ . Рассмотрим линию  $(p_{1\varepsilon} = -\varepsilon \ln \varepsilon) \subset D_2$ . Линией  $(p_{1\varepsilon})$  область  $D_2$  разделяется на части  $D_{21}$  и  $D_{22}$ . Если линия  $(\text{Re } A(\tau(\tilde{\sigma})) = p_1) \in D_{21}$ , то  $0 \leq p_1 < -\varepsilon \ln \varepsilon$ . Если  $(p_1) \in D_{22}$ , то  $-\varepsilon \ln \varepsilon \leq p_1$ . Тогда  $\forall t \in D_{22}$  имеем  $\exp \frac{1}{\varepsilon} \text{Re } a(\tau(\tilde{\sigma})) \rightarrow +\infty$  по  $\varepsilon$ . Отсюда следует  $\exp \frac{1}{\varepsilon} \text{Re } a(\tau(\tilde{\sigma})) \rightarrow +\infty$  по  $\varepsilon$ .

Из (2) имеем

$$|z_2(t, \varepsilon)| \geq \frac{1}{\varepsilon} \exp \frac{1}{\varepsilon} \text{Re } a(\tau(\tilde{\sigma})) \left| |z_2(\tilde{t}, \varepsilon)| - \left| \int_0^\sigma |b(\tau(\sigma))| \exp \frac{-1}{\varepsilon} \text{Re } a(\tau(\sigma)) |d(\tau(\sigma))| \right| \right|$$

$|z_2(\tilde{t}, \varepsilon)|$  ограничена, а интеграл имеет порядок  $\varepsilon$ .

Таким образом,  $\forall t \in D_{22}$   $|z_2(t, \varepsilon)|$  неограниченно по  $\varepsilon$ .

III. Рассмотрим векторные аналитические функции комплексного переменного.

Определение. Пусть  $a(t) = (a_1(t), a_2(t))$ ,  $a_j(t) \in D (j = 1, 2)$  и

$\forall t \in D (a_j(t) \in Q(D))$  то будем говорить, что  $a(t)$  векторная аналитическая функция комплексного переменного с компонентами  $a_j(t) (j = 1, 2)$ .

Пространство таких функций обозначим  $Q^2(D)$ . Пространство функций  $z(t, \varepsilon) = (z_1(t, \varepsilon), z_2(t, \varepsilon))$  обозначим  $Q_\varepsilon^2(D)$ .

Норму определим так

$$\|z(t, \varepsilon)\| = \max |z_j(t, \varepsilon)| \quad (j = 1, 2) \text{ для } t \in D.$$

Пусть:  $z(t, \varepsilon) = I_\varepsilon(a(t)) = \left( \exp \frac{a_1(t)}{\varepsilon}, \exp \frac{a_2(t)}{\varepsilon} \right)$ , тогда  $z(t, \varepsilon) \in Q_\varepsilon^2(D)$ ;

и выполняется условие

$$U2. a_j(t_0) = 0 \text{ и } \forall t \in D (a_j' \neq 0), a_1(t) \neq -a_2(t), j = 1, 2.$$

Из U2 вытекает, что функции  $a_j(t)$  в  $D$  не имеют кратных точек и через каждую точку области  $D$  проходит единственная линия уровня функций  $\text{Re } a_j(t)$ ,  $\text{Im } a_j(t)$ . В отличие от примера I в данном случае область  $D$  покрывается линиями уровней двух пар  $(\text{Re } a_j(t), \text{Im } a_j(t)) (j = 1, 2)$  и это затрудняет описание топологии области  $D$  в терминах линии уровня. Но согласно U2 линии

$$(p_{j_0}^1) = \{t \in D \mid \text{Re } a_j(t) = 0 (j = 1, 2)\}$$

пересекаются в точке  $t = t_0$ .

В общем случае линии  $(p_{j_0}^1)$  могут иметь несколько точек пересечения отличных от  $t_0$  и определить такие точки практически невозможно.

Для наглядности предположим:

U3. Линии  $(p_{j_0}^1)$  в области  $D$  не имеют других точек пересечения, кроме точки  $t_0$ .

Тогда в силу U. 2, U. 3 область  $D$  линиями  $(p_{j_0}^1)$  разделяется на четыре части и только в одной части, эту часть обозначим  $D_1$ , выполняются соотношения.

$\forall t \in D_1 (\text{Re } a_j(t) \leq 0)$ , причем равенства имеет место только на границе  $D_1$ , состоящее из частей линии  $(p_{j_0}^1)$  (рис. 1).

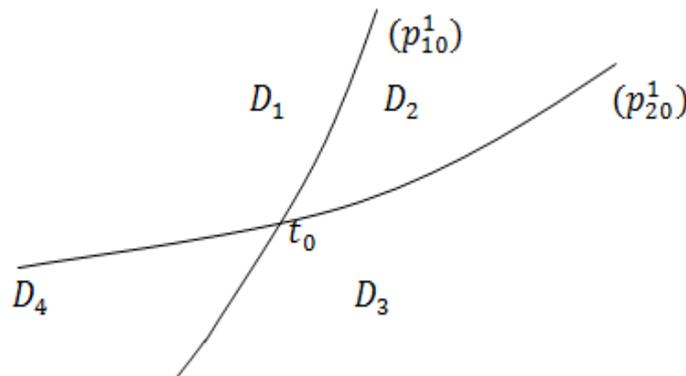


Рис. 1 – Деление области  $D$  линиями  $(p_{j_0}^1)$

Заметим, если в условии U2  $a_1(t) = -a_2(t)$ , то линии  $(p_{j_0}^1) (j = 1, 2)$  совпадают и область  $D$  разделяется на две части, при этом не существует область, где одновременно выполняются неравенства  $\text{Re } a_j(t) \leq 0 (j = 1, 2)$ .

Линиями уровня  $(p_{j\varepsilon}^1(\pm)) = \{t \in D \mid \operatorname{Re} a_j(t) = \pm \varepsilon \ln \varepsilon\}$  области  $D_k (k = 1, 2, 3, 4)$  разделим на части  $D_{\varepsilon m} (m = 1, 2, \dots, 8, D_{k0} k=1, 2, 3, 4)$  (рис. 2).

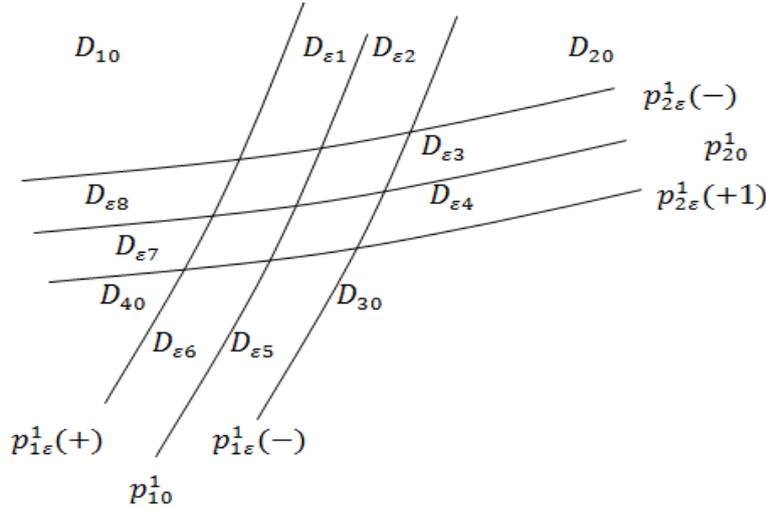


Рис. 2 – Деление областей  $D_k (k = 1, 2, 3, 4)$

Далее исследуем предел

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} I_\varepsilon(a(t)) = \left( \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \exp \frac{1}{\varepsilon} a_1(t), \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \exp \frac{1}{\varepsilon} a_2(t) \right).$$

Если учесть результаты I, то

$$\forall t \in D_{10} \left( \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} I_\varepsilon(a(t)) = (0,0) \right); \forall t \in D_{k0} \left( \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} I_\varepsilon(a(t)) = \infty \right),$$

Для областей  $D_{\varepsilon m}$  пределы  $\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} I_\varepsilon(a(t))$  не существуют.

IV. Пусть  $a(t) = (a_1(t), a_2(t))$ ,  $a_j(t) \in Q(D)$ ;

$$b(t) = (b_1(t), b_2(t)), b_j(t) \in Q(D);$$

$$I_\varepsilon(a(t), a(t)) = \left( \int_{t_0}^t \exp \frac{a_1(\tau)}{\varepsilon} b_1(\tau) d\tau, \int_{t_0}^t \exp \frac{a_2(\tau)}{\varepsilon} b_2(\tau) d\tau \right)$$

и выполняются условия U2, U3.

Для этого случая, учитывая вычисления проведенные в случаях II, III получим  $\forall t \in D_{10} \left( \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} I_\varepsilon(a(t), b(t)) = 0,0; \forall t \in D_{k0} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} I_\varepsilon(a(t), b(t)) = \infty \right)$ ,

а для областей  $D_{\varepsilon m}$  пределы  $\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} I_\varepsilon(a(t), b(t))$  не существуют.

V. Пусть  $a(t) \in Q(D)$ ,  $z(t, \varepsilon) \in Q_\varepsilon(D)$  и  $a(t)$ ,  $z(t, \varepsilon)$  – скалярные функции;

$$I_\varepsilon(a(t), z(t, \varepsilon)) = z_0 \exp \frac{a(t)}{\varepsilon} + \int_{t_0}^t \exp \frac{a(t)-a(\tau)}{\varepsilon} z(\tau, \varepsilon) d\tau, \text{ где} \tag{7}$$

$z_0$  – константа не зависящая от  $\varepsilon$ .

Далее будем рассматривать пространство  $Q_\varepsilon(D)$  с множеством

$H = \{ t \in D \mid |z(t, \varepsilon)| \leq M_0 \}$  – некоторая положительная не зависящая от  $\varepsilon$

Пусть выполняется условия U1.

Решим задачу при каких условиях

$\forall a(t) \in Q(D) \wedge \forall z(t, \varepsilon) \in Q_\varepsilon(D): I_\varepsilon(a(t), z(t, \varepsilon)) \in Q_\varepsilon(D)$  с множеством  $H$ .

Для решения этой задачи как и в I определим линию  $(p_{10})$  и области  $D_1, D_2$ .

В (7) пути интегрирования определим как и в случае II и используем их параметрическое представление.

Пусть  $t \in (p_{10})$ . Тогда из (7) имеем

$$z^*(t, \varepsilon) = I_\varepsilon(a(t), z(t, \varepsilon)) = z_0 \exp \frac{a(t(\tilde{s}))}{\varepsilon} + \int_0^{\tilde{s}} z(\tau(s), \varepsilon) \exp \frac{a(t(\tilde{s})) - a(\tau(s))}{\varepsilon} d\tau(s) \tag{8}$$

где  $Rea(t(\tilde{s})) = 0, Rea(\tau(s)) = 0$

Поведение интеграла в (8) при  $\varepsilon \rightarrow 0$ , имеющимися сведениями о функции  $z(\tau(s), \varepsilon)$  невозможно определить, но этот интеграл ограничен. Наличие первого слагаемого показывает, в рассматриваемом случае, предел  $\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} I_\varepsilon(a(t), z(t, \varepsilon))$  не существует.

Из (8) переходя к модулю получим

$$|z^*(t, \varepsilon)| = |I_\varepsilon(a(t), z(t, \varepsilon))| \leq |z_0| + M_1 \tilde{s},$$

где  $M_1 = M_0 \cdot M_{01}, M_{01} = \max|\tau'(s)|$ .

Отсюда при

$$\tilde{s} \leq \frac{M_0 - |z_0|}{M_1} \quad (9)$$

$$|z^{**}(t, \varepsilon)| = |I_\varepsilon(a(t), z(t, \varepsilon))| \leq M_0, |z_0| < M_0.$$

Теперь рассмотрим случай  $t \in D_1$ .

Для этого случая из (7) имеем

$$\begin{aligned} z^{**}(t, \varepsilon) &= I_\varepsilon(a(t), z(t, \varepsilon)) = z_0 \exp \frac{Rea(t(\tilde{\sigma})) + ip_2}{\varepsilon} - \\ &- \int_0^{\tilde{s}} \exp \left( \frac{Rea(t(\tilde{\sigma})) + ip_2}{\varepsilon} - \frac{iIma(\tau(s))}{\varepsilon} \right) \cdot z(\tau(s), \varepsilon) d\tau(s) + \\ &+ \int_0^{\tilde{\sigma}} \exp \frac{Rea(t(\tilde{\sigma})) - Rea(\tau(\tilde{\sigma}))}{\varepsilon} \cdot z(\tau(\sigma), \varepsilon) d\tau(\sigma) \end{aligned} \quad (10)$$

где  $p_2 = Ima(t(\tilde{s}))$ .

В (10) проведем следующее преобразование

$$\begin{aligned} z^{**}(t, \varepsilon) &= \exp \frac{Rea(t(\tilde{\sigma}))}{\varepsilon} [z_0 \exp \frac{ip_2}{\varepsilon} + \\ &+ \int_0^{\tilde{s}} z(\tau(s), \varepsilon) \exp \frac{ip_2 - iIma(\tau(s))}{\varepsilon} d\tau(s)] + \\ &+ \int_0^{\tilde{\sigma}} z(\tau(\sigma), \varepsilon) \exp \frac{Rea(t(\tilde{\sigma})) - Rea(\tau(\tilde{\sigma}))}{\varepsilon} \cdot d\tau(\sigma). \end{aligned} \quad (11)$$

В (11) выражение содержащееся в [...] даёт функцию  $z^*(t, \varepsilon)$ . Учитывая это (11) перепишем в виде

$$z^{**}(t, \varepsilon) = z^*(t, \varepsilon) \exp \frac{Rea(t(\tilde{\sigma}))}{\varepsilon} + \int_0^{\tilde{\sigma}} z(\tau(\sigma), \varepsilon) \exp \frac{Rea(t(\tilde{\sigma})) - Rea(\tau(\tilde{\sigma}))}{\varepsilon} d\tau(\sigma). \quad (12)$$

Если  $t \in D_{1\varepsilon}$  (определена в I), то из (12) вытекает

$$|z^{**}(t, \varepsilon)| \leq z^* \exp \frac{Rea(t(\tilde{\sigma}))}{\varepsilon} + M_0 M_{02} \int_0^{\tilde{\sigma}} \exp \frac{Rea(t(\tilde{\sigma})) - Rea(\tau(\tilde{\sigma}))}{\varepsilon} d\tau, \quad (13)$$

где  $M_{02} = \max|\tau'(\sigma)|$ .

К интегралу (13), применяя метод интегрирование по частям (функция  $Rea(t(\tilde{\sigma}))$  строго монотонна вдоль линии  $(p_2)$ , что и обеспечивает такую возможность) получим

$$\int_0^{\tilde{\sigma}} \exp \frac{Rea(t(\tilde{\sigma})) - Rea(t(\sigma))}{\varepsilon} d\sigma \leq M_{03} \varepsilon,$$

где  $0 \leq M_{03}$  – некоторая постоянная не зависящая от  $\varepsilon$ .

Таким образом

$$|z^{**}(t, \varepsilon)| \leq |z^*(t, \varepsilon)| \exp \frac{Rea(t(\tilde{\sigma}))}{\varepsilon} + M_4 \varepsilon, \quad \text{где } M_4 = M_0 M_{02} M_{03}.$$

По определению  $D_1 = D_{1\varepsilon} \cup D_{11}$ . Если  $t \in D_{1\varepsilon}$ , то

$$|z^{**}(t, \varepsilon)| \leq |z^*(t, \varepsilon)| + M_4 \varepsilon \leq M_1 \tilde{s} + M_4 \varepsilon,$$

Отсюда при условии  $\tilde{s} \leq \frac{M_0 - M_4 \varepsilon}{M_1} < \frac{M_0 - |z_0|}{M_1}$ , следует неравенство

$$|z^{**}(t, \varepsilon)| \leq M_0.$$

Если  $t \in D_{11}$ , то  $\exp \frac{\operatorname{Re} a(t(\bar{\sigma}))}{\varepsilon} = o(\varepsilon^n), n \in \mathbb{N}$ .

В этом случае  $\forall t \in D_{11} \quad (|z^{**}(t, \varepsilon)| \leq M_0)$

Пусть  $t \in D_2 = D_{2\varepsilon} \cup D_{21}$ . (11) представим в виде

$$z^{**}(t, \varepsilon) = \exp \frac{\operatorname{Re} a(t(\bar{\sigma}))}{\varepsilon} \left[ z^*(t, \varepsilon) + \int_0^{\bar{\sigma}} z(\tau(\sigma), \varepsilon) \cdot \exp \frac{-\operatorname{Re} a(t(\bar{\sigma}))}{\varepsilon} d\tau(\sigma) \right].$$

Если  $t \in D_{2\varepsilon}$ , то  $|z^{**}(t, \varepsilon)|$  – органичена.

Если  $t \in D_{2\varepsilon}$ , то  $\exp \frac{\operatorname{Re} a(t(\bar{\sigma}))}{\varepsilon} \rightarrow \infty$  а выражение содержащееся в [...] ограничена по модулю. Следовательно  $|z^{**}(t, \varepsilon)|$  не ограничена.

### Выводы

Таким образом доказано, что аналитические функции (скалярные или векторные) с малыми параметрами обладают рядом специфических свойств. В частности существуют линии делящие области на части и на таких линиях и областях примыкающих к данным линиям пределы функции  $z(t, \varepsilon)$  по малому параметру не существуют, а в других областях бесконечны или существуют и в последнем случае предельная функция принадлежит к пространству  $Q(D)$  или  $Q(D')(D' \subset D)$ .

При рассмотрении операторов  $I_\varepsilon(a(t), z(t, \varepsilon))$  отображающих элементы из пространства  $a(t) \in Q(D)$  и  $z(t, \varepsilon) \in Q_\varepsilon(D)$  с множеством  $\{|z(t, \varepsilon)| \leq M_0\}$  элемент  $z^*(t, \varepsilon) = I_\varepsilon(a(t), z(t, \varepsilon))$  только при определенных условиях принадлежит пространству  $Q_\varepsilon(D_0)(D_0 \subset D)$  с множеством  $\{|z(t, \varepsilon)| \leq M_0\}$

### Конфликт интересов

Не указан.

### Conflict of Interest

None declared.

### Список литературы / References

1. Евграфов М.А. Аналитические функции / М.А. Евграфов. – Москва: Наука, 1991. - 448 с.
2. Лаврентьев М.А. Методы теории функций комплексного переменного / М.А. Лаврентьев, Б.В. Шабат. – Москва: Наука, 1973. – 739 с.
3. Федорюк М.В. Метод перевала / М.В.Федорюк. – Москва: Наука, 1977. - 368 с.
4. Алыбаев К.С. Метод линий уровня исследования сингулярно возмущенных уравнений при нарушении условия устойчивости / Алыбаев К.С. // Вестник КГНУ. – Серия 3, Выпуск 6. – Бишкек, 2001. – С. 190-200.
5. Алыбаев К.С. Метод погранслоевых линий построения регулярно и сингулярных областей для линейных сингулярно возмущенных уравнений с аналитическими функциями /К.С. Алыбаев, К.Б. Тампагаров //Естественные и математические науки в современном мире: сб. статей по материалам XLVII международной научно-практической конференции. № 10 (45). Россия, Новосибирск: СиБАК, 2016. - С.59-66.
6. Шишкова М.А. Рассмотрение одной системы дифференциальных уравнений с малым параметром при высших производных /М.А.Шишкова//Доклады АН СССР. – 1973. - Т. 209, № 3. – С. 576-579.
7. Алыбаев К.С. Построение областей притяжения при вырождении сингулярно возмущенных уравнений /К.С. Алыбаев, А.Б. Мурзабаева // Международный научно-исследовательский журнал. № 9 (75). Екатеринбург, 2018. - С. 7-11.

### Список литературы на английском языке / References in English

1. Evgrafov M. A. Analiticheskie funkicii [Analytical functions]/ M. A. Evgrafov. - Moscow: Nauka, 1991. - 448 PP. [in Russian]
2. Lavrentiev M. A. Metody teorii funkciy kompleksnogo peremennogo [Methods of the theory of functions of a complex variable] / M. A. Lavrentiev, B. V. Shabat. - Moscow: Nauka, 1973. – 739 p [in Russian]
3. Fedoryuk M. V. Metod perevala [The method of the pass] / M. V. Fedoryuk. Moscow: Nauka, 1977. - 368 p. [in Russian]
4. Alybaev K. S. Metod linij urovnya issledovaniya singulyarno vozmushchennyh uravnenij pri narushenii usloviya ustojchivosti [Method of level lines of the study of singularly perturbed equations in violation of the conditions of stability] / Alybaev K. S. // Vestnik KNU. - Series 3, Issue 6. - Bishkek, 2001. - Pp. 190-200. [in Russian]
5. Alybaev K. S. Metod pogranslojnyh linij postroeniya reguljarno i singulyarnyh oblastej dlya linejnyh singulyarno vozmushchennyh uravnenij s analiticheskimi funkciyami [Method of boundary-layer lines of regular and singular domains construction for linear singularly perturbed equations with analytical functions] /K. S. Alybaev, K. B. Tampagarov //Natural and mathematical Sciences in the modern world: collection of articles based on XLVII international scientific-practical conference. No. 10 (45). Russia, Novosibirsk: Sibak, 2016. - Pp. 59-66. [in Russian]
6. Shishkova M. A. Rassmotrenie odnoj sistemy differencial'nyh uravnenij s malym parametrom pri vysshih proizvodnyh [Consideration of one system of differential equations with a small parameter at higher derivatives] /M. A. Shishkova/ / Reports of the USSR Academy of Sciences. - 1973. - Vol. 209, No. 3. - Pp. 576-579. [in Russian]
7. Alybaev K. S. Postroenie oblastej prityazheniya pri vyrozhdении singulyarno vozmushchennyh uravnenij [Construction of regions of attraction at degeneration of singularly perturbed equations] / K. S. Alybaev, A. B. Murzabaeva // international scientific research journal. No. 9 (75). Ekaterinburg, 2018. - Pp. 7-11. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.90.12.003>**ВЫЧИСЛЕНИЕ ПО МЕТОДУ ДИРАКА-ФОКА СЕЧЕНИЙ ФОТОИОНИЗАЦИИ ДЛЯ ИОНОВ ИЗОЭЛЕКТРОННОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ЦЕЗИЯ**

Научная статья

**Зилитис В.А. \***

ORCID: 0000-0002-1692-9493,

Институт математики и информатики Латвийского университета, Рига, Латвия

\* Корреспондирующий автор (zilitis[at]latnet.lv)

**Аннотация**

Релятивистским методом самосогласованного поля Дирака-Фока вычислены сечения фотоионизации для основных и некоторых возбужденных состояний для 10 ионов изоэлектронной последовательности цезия от  $Ba^+$  до  $Tb^{10+}$ . Рассматриваются зависимость сечений фотоионизации от энергии, а также изменение пороговых сечений вдоль изоэлектронной последовательности. Кроме полных сечений фотоионизации были вычислены также параметр асимметрии в угловом распределении фотоэлектронов и степень поляризации фотоэлектронов.

**Ключевые слова:** Сечения фотоионизации, Cs-подобные ионы, метод Дирака-Фока.

**CALCULATION OF THE PHOTOIONIZATION CROSS SECTIONS FOR THE IONS OF THE CESIUM ISOELECTRONIC SEQUENCE BY THE DIRAC-FOCK METHOD**

Research article

**Zilitis V.A. \***

ORCID: 0000-0002-1692-9493,

Institute of Mathematics and Computer Science, University of Latvia, Riga, Latvia

\* Corresponding author (zilitis[at]latnet.lv)

**Abstract**

The photoionization cross sections for the ground and same excited states of 10 ions cesium isoelectronic sequence from  $Ba^+$  through  $Tb^{10+}$  are calculated by the relativistic Dirac-Fock self-consistent field method. The energy dependence of the photoionization cross sections and the changes in the threshold values along the isoelectronic sequence are considered. Along with the total photoionization cross sections, the asymmetry parameter in the angular distribution of photoelectrons and the degree of their polarization are also calculated.

**Keywords:** Photoionization cross sections, Cs-like ions, Dirac-Fock method.

**Introduction**

Since the investigation of diverse physical processes involving multiply charged ions is becoming increasingly extensive, there is growing interest in studying the photoionization cross sections of such ions [1]. There are currently few experimental data for such cross sections, so theoretical methods of calculation become important. For the purpose of interpolation or extrapolation, it is expedient to study the characteristics of ions along isoelectronic sequences. The study of the behavior of photoionization cross sections along the isoelectronic sequence is of interest also because the photoionization cross sections in the near-threshold energy region are associated with the corresponding oscillator strengths.

For neutral atoms, in particular, for atoms whose outer shell is closed or possesses several valence electrons, the interaction of a photoelectrons with the other electrons of this shell plays a significant role. A number of methods have been developed that more or less take into account these correlations. These methods include the method of random phase approximation with exchange [2], the many-body perturbation theory [3], the R-matrix theory [4], the model potential method [5], etc.

**Results and Discussion**

In this paper, photoionization of Cs-like ions is investigated. These ions have a relatively simple configuration - one optical electron above the filled shells. The electrons of closed shells are relatively strongly coupled, and the interaction between the photoelectron and the electrons of the core is relatively weak. In addition, the influence of the correlation and polarization effects with increasing charge of the ion  $q$  decreases. But as the ion charge increases, relativistic effects increase noticeably. Taking this into account, in this paper, in the calculation of photoionization cross sections, the relativistic Dirac-Fock self-consistent field method (DF) was used [6].

In [7], the procedure for calculating the photoionization cross sections based on the DF method with the exchange effect correctly taken into account was described. In the present paper we calculate the photoionization cross sections for the ground and certain excited states of ions of the isoelectronic sequence of cesium (In this paper, the photoionization cross sections are measured in Mb ( $1 \text{ Mb} = 10^{-18} \text{ cm}^2$ ) and the photon energy  $\omega$  and the photoelectron energy  $E$  in Ry). It should be noted that, unlike, for example, the isoelectronic sequence of lithium, the ground state varies several times along the isoelectronic sequence of cesium. The  $Ba^+$  ion, as well as the neutral Cs, has a  $6s^2 S_{1/2}$  configuration in the ground state. During photoionization, transitions to the continuous spectrum  $6s_{1/2} \rightarrow Ep_{1/2}$  and  $Ep_{3/2}$  are allowed for the valence electron. For  $La^{++}$ , the ground state of  $5d^2 D_{3/2}$  and the electron from the  $5d_{3/2}$  level can go over into the continuous spectrum by  $Ep_{1/2}$ ,  $Ep_{3/2}$  and  $Ef_{5/2}$ . Starting with the  $Ce^{3+}$  ion, the configuration is  $4f^2 F_{5/2}$  and  $4f_{5/2} \rightarrow Ed_{3/2}$ ,  $Ed_{5/2}$  and  $Eg_{7/2}$  transitions are allowed. This complicates calculations. As is well known, contributions to the total cross section of photoionization yield all allowed transitions.

Considered were relatively small photon energies, for which the ionization of the electrons of the inner shells has not yet occurred. Autoionization and processes involving internal electrons were not taken into account. The exchange and retardation effects are accurately taken into account. All calculations were carried out for two values of the gauge constant:  $G = 0$  (Coulomb gauge) and  $G = \sqrt{2}$  (Babushkin gauge) [7]. In the nonrelativistic theory, the Coulomb gauge corresponds to using the matrix element in the form of "velocity," and Babushkin's gauge, in the form of "length"; therefore, the corresponding cross-section values are labeled by the indices "V" and "L". We also considered the influence of the choice of gauge on the calculated values of the cross sections, i.e. the difference between  $\sigma_L$  and  $\sigma_V$ . One would expect that with the growth of the ion charge this difference will decrease, since usually the ions become more hydrogen-like.

The photoionization cross sections for the  $6s_{1/2}$ -levels of Cs and  $Ba^+$  near the ionization threshold have a Cooper minimum, so the absolute values of  $\sigma(E)$  are small. In this case, the choice of gauge is strongly influenced and the values of  $\sigma_L(E)$  and  $\sigma_V(E)$  differ significantly. But as can be seen from Fig. 1, the difference between  $\sigma_L(0)$  and  $\sigma_V(0)$  decreases with increasing charge of the ion  $q$ . For levels  $5d_{3/2}$  of  $La^{++}$  and  $Ce^{3+}$  ions, the value of  $\sigma(E)$  is larger and the effect of calibration is relatively smaller.

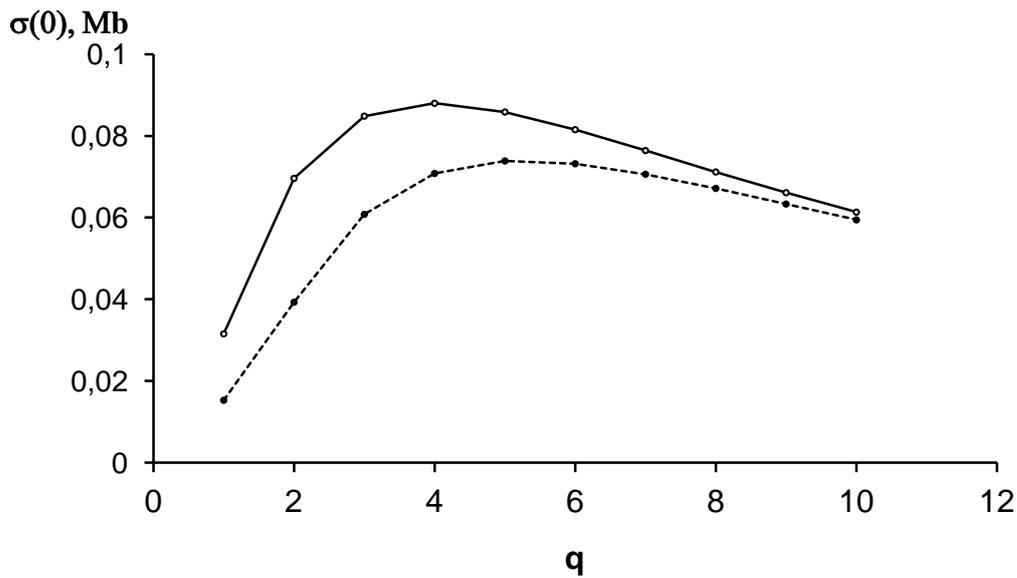


Fig. 1 – Change in the total threshold photoionization cross sections along the isoelectronic sequence of cesium for  $6s_{1/2}$  states

The solid line is  $\sigma_V(E)$ , the dashed line is  $\sigma_L(E)$ , and  $q$  is the ion charge.

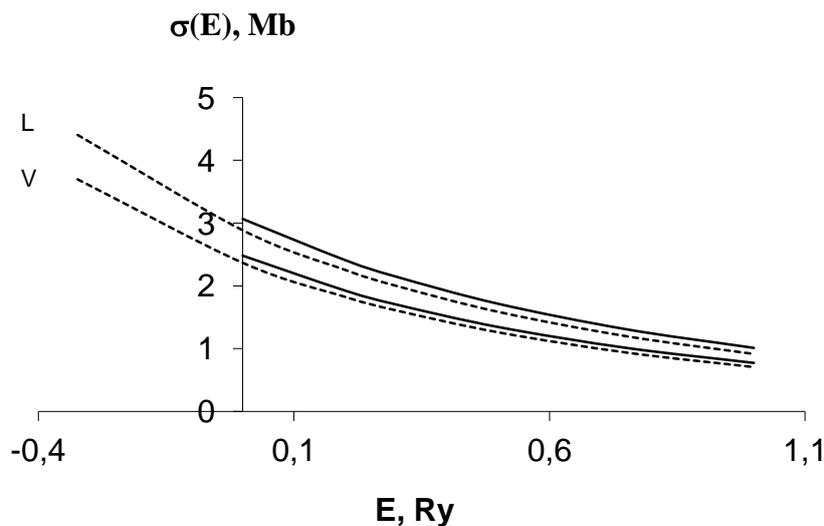


Fig. 2 – Photoionization cross sections for the  $5d_{3/2}$  state of the  $Ce^{3+}$  ion

The solid line is the total cross section  $\sigma(E)$ , the dashed line is the cross sections for the channel  $5d_{3/2} \rightarrow Ef_{5/2}$ .

In Fig. 2 shows the total photoionization cross section for the  $5d_{3/2}$   $Ce^{3+}$  level. In the same place,  $\sigma(E)$  is depicted for the channel  $5d_{3/2} \rightarrow Ef_{5/2}$ . It is seen that the channel  $5d_{3/2} \rightarrow Ef_{5/2}$  determines the total contribution, and the remaining ( $5d_{3/2} \rightarrow Ep_{1/2}$  and  $Ep_{3/2}$ ) only about 6%. A similar situation occurs when the  $4f^2F_{5/2}^o$  levels of  $Ce^{3+}$  and  $Pr^{4+}$  ions are photoionized. There the channel  $4f_{5/2} \rightarrow Eg_{7/2}$  is about 98% of the total cross section - see Fig. 3. Using the well-known relationship between the photoionization cross sections and the oscillator strengths, the values of  $\tau(E_n)$  (Fig. 2 and Fig. 3) are determined using the values of the oscillator strengths for the  $5d_{3/2} \rightarrow 8f_{5/2}$  and  $4f_{5/2} \rightarrow 8g_{7/2}$  transitions are plotted in the discrete spectrum, respectively.

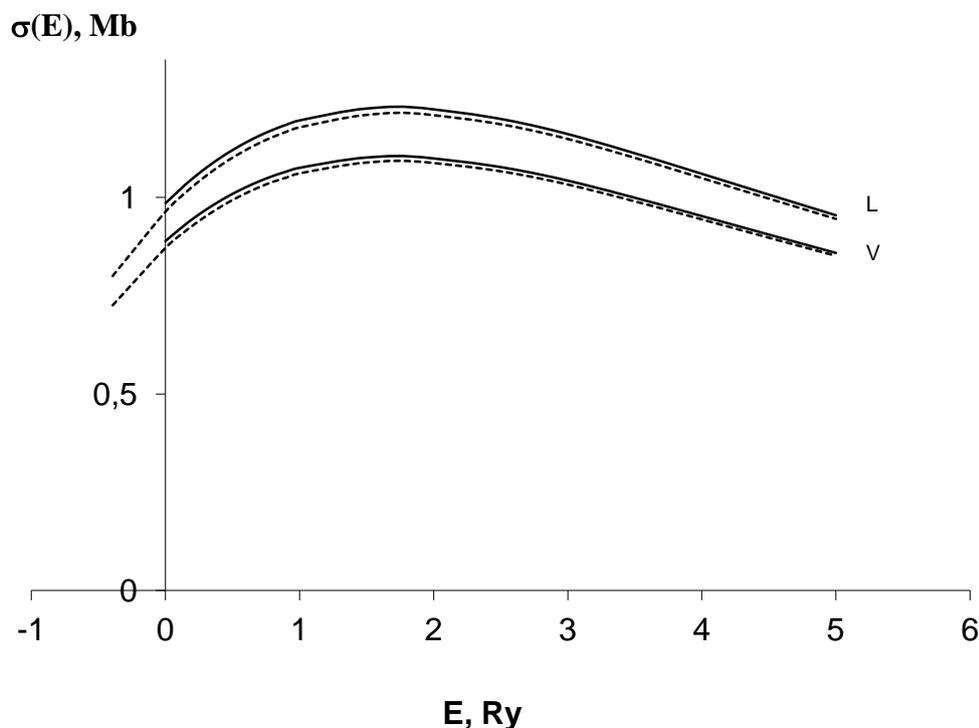


Fig. 3 – Photoionization cross sections for the  $4f_{5/2}$  state of the  $Pr^{4+}$  ion

The solid line is the total cross section  $\sigma(E)$ , the dashed line is the cross section for the  $4f_{5/2} \rightarrow Eg_{7/2}$  channel.

The calculated total photoionization cross sections for  $\sigma_L(E)$  and  $\sigma_V(E)$  of the ground state  $5d_{3/2}$  of the  $La^{++}$  ion are listed in the table.

Table 1 – The total photoionization cross sections  $\sigma(E)$  for the ground state  $5d_{3/2}$  of the  $La^{++}$  ion.  $\omega$  is the photon energy,  $E$  is the photoelectron energy

$E, Ry$	$\omega, Ry$	$\sigma_L(E), Mb$	$\sigma_V(E), Mb$
0	1.329	5,72	4,86
0.08	1.409	5,13	4,33
0.1	1.429	5,00	4,21
0.2	1.529	4,38	3,65
0.3	1.629	3,85	3,18
0.4	1.729	3,40	2,78
0.5	1.829	3,01	2,44
0.6	1.929	2,67	2,15
0.7	2.029	2,37	1,89
0.8	2.129	2,12	1,67
0.9	2.229	1,89	1,49
1.0	2.329	1,69	1,32

Calculations of the photoionization cross sections were carried out on the basis of the DF method with correct exchange allowance. In [8], the influence of exchange accounting on the calculated values of the cross sections was studied. The obtained results showed that a correct exchange allowance leads to a significant convergence of the values of  $\sigma_L$  and  $\sigma_V$ . Therefore, allowance for exchange for photoionization is essential.

In studying the photoionization of the 6s electrons of the Cs-like ions, we also determined the values of the asymmetry parameter in the angular distribution of photoelectrons  $\beta(E)$  and the degree of polarization of photoelectrons  $p(E)$  [2], [7]. According to the Cooper-Zare theorem, in the nonrelativistic approximation, the asymmetry parameter for the ns-electron does not depend on the energy and  $\beta(E)=2$ . In the relativistic theory, the interference between the  $ns_{1/2} \rightarrow Ep_{1/2}$  and  $ns_{1/2} \rightarrow Ep_{3/2}$  channels causes  $\beta(E)$  to vary from -1 to 2 in the vicinity of the Cooper minimum [9]. For  $Ba^+$ , the Cooper minimum is near the

threshold and  $\beta_L(0)=-0.972$  and  $\beta_L(5)= 1.91$  were obtained. In [10], the dependence of  $\beta(E)$  on energy and on the choice of gauge for a neutral Cs atom was studied. We also calculated the degree of the polarization of photoelectrons  $p(E)$ , where  $p(E)$  is the degree of polarization of photoelectrons under photoionization by circularly polarized light (the Fano effect). For  $Ba^+$ , the large value of  $p(E)$  has  $p_L(0) = 0.379$  for the ionization threshold, and  $p_L(1) = -0.409$ . The Cs-like ions differ by this property from Li-like ions, for which (except for Li)  $p(E)$  is practically zero [7].

### Conclusion

Unfortunately, direct comparison with experimental findings is impossible since experimental results for the ions in question are unavailable. The photoionization cross sections for the  $6s_{1/2}$  levels near the ionization threshold have a Cooper minimum; therefore, the absolute values of  $\sigma(E)$  are small. In this case, the choice of calibration strongly affects and the values of  $\sigma_L(E)$  and  $\sigma_V(E)$  differ significantly. Correlation corrections should be taken into account here. It can be expected that the calculated values of photoionization cross sections for the  $5d_{3/2}$  and  $4f_{5/2}$  levels will be more accurate, since the corresponding  $\sigma_L(E)$  and  $\sigma_V(E)$  differ less.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Conflict of Interest

None declared.

### Список литературы / References

1. West J. B. Photoionization of atomic ions / J. B. West // J. Phys. B. - 2001. -V. - 34. - P. R45 - R91.
2. Amusia M. Ya. Atomic Photoeffect. / M. Ya. Amusia. - New York: Springer-Verlag, 1990. - 318 p.
3. Lui J.C. Satellites and resonant satellites in the photoionization of atomic Cu / J. C. Lui, Z. W. Lui., H. P. Kelly // Phys. Rev. A. - 1994. - V. 50. - P. 3903.
4. Noble C. J. Multichannel resonances in complex energy R-matrix theory / C. J. Noble, M. Dorr, P. G. Burke. // J. Phys. B. - 1993. - V. 26. - P. 2983.
5. Derevianko A. Many-body and model-potential calculations of low-energy photoionization parameters for francium / A. Derevianko, W. R. Johnson, H. R. Sadeghpour // Phys. Rev. A. - 2000. - V. 61. - P. 022506.
6. Andersone E. K. Relativistic self-consistent field calculations of atomic properties / E. K. Andersone, E. M. Anderson, M. O. Eglajs, V. F. Trusov, V. A. Zilitis. // Sixth International Conference on Atomic Physics, Riga, August 17 - 22, Abstracts, Riga, - 1978, - p. 180.
7. Zilitis V .A. Calculation of photoionization cross sections for lithium-like ions by the Dirac-Fock method / V .A. Zilitis // Opt. Spectrosc. - 1982. - V. 53. - № 2. - P. 204.
8. Zilitis V. A. Calculation of the photoionization cross sections for the ions of the rubidium isoelectronic sequence by the Dirac-Fock method / V. A. Zilitis // Opt. Spectrosc. - 2006. - V. 101. - № 5. - P. 661.
9. Ong W. Photoelectron angular distributions for the outer shell of the alkali-metal atoms / W. Ong, S. T. Manson // Phys.Rev. A. - 1979. - V. 20. - P. 2364.
10. Pindzola M. S. Photoelectron angular distributions for excited ns subshells of cesium / M. S. Pindzola // Phys.Rev. A. - 1985. - V. 35. - P. 1883.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.90.12.004>

## АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО ЛАГРАНЖЕВОГО МЕТОДА ДЛЯ ОПИСАНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ ГЛУБОКОВОДНОГО ИСТЕЧЕНИЯ НЕФТЕПРОДУКТОВ ПРИ ПОВРЕЖДЕНИЯХ МОРСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ

Научная статья

Кильдибаева С.Р. \*

ORCID: 0000-0001-9586-8926,

Стерлитамакский филиал ФГБОУ ВО Башкирский государственный университет, Стерлитамак, Россия

\* Корреспондирующий автор (freya.13[at]mail.ru)

### Аннотация

В работе приводится математическая модель, описывающая распространение многофазной затопленной струи, возникновение которой обусловлено повреждением нефтедобывающей конструкции или морского трубопровода, через который транспортировались углеводороды. Исследованы особенности течения многофазных и однофазных (газовых) струй, рассмотрено влияние гидратообразования на параметры струи. Для расчета теплофизических параметров использован интегральный Лагранжевый метод. В результате расчетов получены зависимости температуры и скорости струи от вертикальной координаты. Анализ данных зависимостей позволит спрогнозировать поведение струи, а также исследовать возможность использования устройств для ликвидации утечек.

**Ключевые слова:** нефтяной разлив, шельф, миграция пузырьков метана, гидратообразование, устранение утечек.

## SOME ASPECTS OF INTEGRAL GRANGE METHOD APPLICATION FOR DESCRIPTION OF FEATURES OF DEEP-WATER DRAINING OF OIL PRODUCTS IN CASE OF MARINE PIPELINES DAMAGE

Research article

Kildibaeva S.R. \*

ORCID: 0000-0001-9586-8926,

Sterlitamak branch of FSBEI of HE Bashkir State University, Sterlitamak, Russia

\* Corresponding author (freya.13[at]mail.ru)

### Abstract

The author uses a mathematical model describing the propagation of a multiphase flooded jet caused by the damage to the oil-producing structure or the marine pipeline used for the transportation of hydrocarbons. The flow features of multiphase and single-phase (gas) jets are studied. The author also studied the effect of hydrate formation on the jet parameters. The integral Lagrange method is used to calculate the thermophysical parameters. As a result of these calculations, the author obtained the dependences of temperature and velocity on the vertical coordinate. Data analysis of dependencies allows predicting jet behavior and study the possibilities of application of devices for leak detection.

**Keywords:** oil spill, shelf, methane bubble migration, hydrate formation, leak elimination.

### Введение

Исследованию особенностей ликвидации глубоководных техногенных разливов уделяется большое внимание в связи с увеличением объемов добычи нефти на шельфе Мирового океана. Данное направление нефтедобычи активно развивается в связи с практически нетронутыми запасами углеводородов, но на практике в случае аварии возрастает опасность разлива нефтепродуктов в водоем. Как показали случаи таких разливов в Мексиканском заливе [1], технологии, доступные на сегодняшний день, обладают рядом негативных аспектов: продолжительное время ликвидации разлива, отсутствие методов сбора углеводородов и учета влияния гидратообразования.

В связи с этим увеличивается интерес исследователей к моделированию устройств для сбора углеводородов при их разливе. Один из способов ликвидации утечки – установка устройства в форме купола над местом утечки. Такое устройство может производить сбор и дальнейшую транспортировку углеводородов. Купол крепится ко дну специальными тросами, к нему подключаются специальные трубки, которые позволяют откачивать нефтепродукты. Более подробная схема купола приводится в работах [2], [3]. Для моделирования работы устройства необходимо рассмотреть распространение струйных течений, характер течения которых зависит от состава струи, начальной скорости углеводородов и окружающей среды, а также температуры углеводородов и термобарических параметров окружающей воды [4].

Целью работы является математическое моделирование многофазных затопленных струй. Анализ динамики изменения теплофизических параметров струи позволит спрогнозировать поведением струи и расширить теоретические знания о распространении затопленных струй.

Актуальность работы связана с необходимостью исследования особенностей распространения нефтепродуктов при возможных утечках в воды Мирового океана. Прогноз миграции нефтепродуктов позволит расширить теоретические знания о процессе распространения углеводородов и уменьшить время устранения возможной утечки.

### Постановка задачи и основные допущения

Рассмотрим на дне водоема поврежденную скважину или трубопровод, из которого вытекает смесь нефти и газа. Известны следующие параметры истечения: радиус, состав, температура, плотность, объемный расход. Также известны характеристики окружающей среды. Течение затопленной струи (схема приведена на рис.1) может быть описано с использованием интегрального Лагранжевого метода. Суть метода заключается в следующем: струя представляется в виде элементарных объемов. Каждый такой объем характеризуется значениями температуры,

скорости, плотности, координатами в пространстве, а также объемными содержаниями каждого типа углеводорода в струе. Так как параметры элементарного объема соответствуют параметрам струи, то получив зависимости температуры, скорости, плотности, координат и объемных содержаний в контрольном объеме, будем знать все аналогичные параметры затопленной струи.

Подробнее описание метода приведено в работе [4]. Траектория струи может искривляться из-за подводных течений. При моделировании распространения примем, что нефть и газ распространяются соответственно в виде капель и пузырьков. В зависимости от характеристик окружающей среды, где истекает струя, существует два варианта течения струи: с фазовыми превращениями и без. В первом случае температура и давление на глубине распространения струи таковы, что на пузырьках газа начинается процесс образования гидратной корки. Во втором случае значения температуры и давления не соответствуют условиям гидратообразования, и гидратная корка не образуется. В данной работе рассмотрим первый случай, соответствующий глубоководным разливам.

Процесс гидратообразования оказывает существенное влияние на параметры струи: например, так как гидратообразование является экзотермическим процессом, температура струи для двух описанных выше случаев может различаться. Интенсивность выделения тепла напрямую соответствует интенсивности гидратообразования и содержания газа в струе.

Для процесса гидратообразования будет характерна следующая динамика изменения пузырька: сначала он будет полностью газовым, затем на его поверхности начнет появляться гидрат (композитный пузырёк), затем пузырек полностью станет гидратным, что станет завершающим этапом.

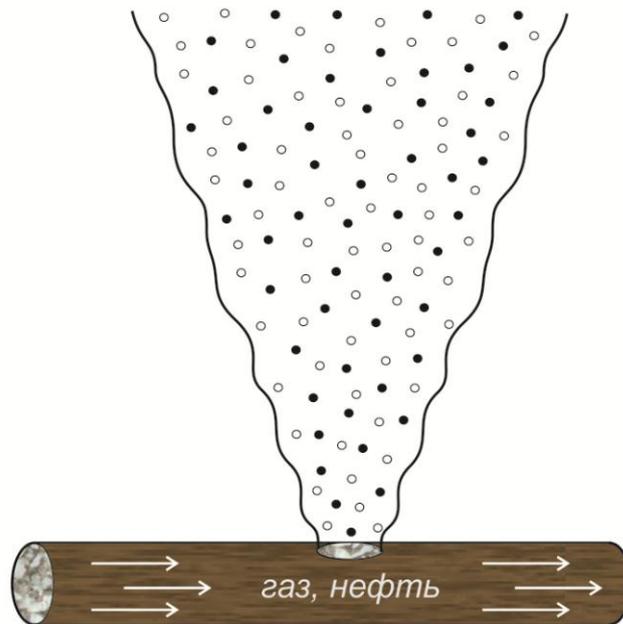


Рис. 1 – Схема течения многофазной затопленной струи

Запишем систему уравнений для многофазной струи:

$$\begin{aligned} \frac{dM_o}{dt} = 0, \quad \frac{dM_g}{dt} = -J_g - \rho_g Q_g^f, \quad \frac{dM_h}{dt} = J_h - \rho_h Q_h^f, \quad \frac{dM_w}{dt} = \rho_w Q_w - J_w, \\ J_g = G \cdot J_h, \quad J_w = (1 - G) J_h, \quad J_h = N 4 \pi a_{gh}^2 j_h, \\ \frac{d}{dt} (Mu) = u_w \rho_w Q_w - u \rho_{com} Q^f, \\ \frac{d}{dt} (Mv) = v_w \rho_w Q_w - v \rho_{com} Q^f, \\ \frac{d}{dt} \left[ (M_w + M_o) w + (M_g + M_h) \cdot (w + w_b) \right] = w_w \rho_w Q_w - (w + w_b) \rho_{com} Q^f + \\ + (\rho_w - \rho_l) \pi b^2 h (\alpha_w + \alpha_o) g + (\rho_w - \rho_{com}) \pi b^2 h (\alpha_g + \alpha_h) g, \\ \frac{d}{dt} (cMT) = c_w T_w \rho_w Q_w + J_h L - J_w c_w T_{hs}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $M_i, \rho_i$  ( $i = o, g, h, w$ ) – масса и плотность компонентов в струе;  $Q_w$  – объемный расход «захваченной» в струю воды;  $Q_i^f$  ( $i = g, h$ ) – объемный расход пузырьков, «покидающих» контрольный объем;  $a_{gh}, \rho_{com}, N$  – радиус и плотность пузырька;  $C, T$  – теплоёмкость и температура КО,  $C_w, T_w$  – теплоёмкость и температура воды,  $C_i, \chi_i = M_i/M$  ( $i = o, g, h, w$ ) – теплоёмкость и массовое содержание компоненты в КО. Здесь и далее нижние индексы  $o$  – нефть,  $g$  – газ,  $h$  – гидрат,  $w$  – вода.

Система уравнений (1) решается численно для параметров, соответствующих разливу нефти в Мексиканском заливе.

#### Результаты расчетов

Начальные параметры системы:  $r = 0.05 \text{ м}$ ,  $T^e = 80^\circ\text{C}$ ,  $T_w = 4^\circ\text{C}$ ,  $Q_o^e = 0.05 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $Q_g^e = 0.05 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $u_w = 0 \text{ м/с}$ ,  $w_w = 0 \text{ м/с}$ ,  $v_w = 0 \text{ м/с}$ ,  $\rho_o = 650 \text{ кг/м}^3$ ,  $\rho_h = 910 \text{ кг/м}^3$ ,  $a_o = 6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ,  $h_z = 1500 \text{ м}$ ,  $p_0 = 15 \text{ МПа}$ .

На рисунке 2 представлена зависимость температуры от вертикальной координаты. Здесь и далее сплошная линия – случай, когда струя многофазная (состоит из газа и нефти), а штриховая линия – случай однофазной газовой струи ( $Q_o^e = 0 \text{ м}^3/\text{с}$ ). Начальная температура струи  $80^\circ\text{C}$ , окружающей среды  $4^\circ\text{C}$ . При течении струи происходит турбулентное вовлечение окружающей более холодной воды в струю, поэтому с увеличением вертикальной координаты температура струи уменьшается. Для случая газовой струи уменьшение температуры происходит более быстро, это связано с меньшим объемным содержанием углеводородов в струе.

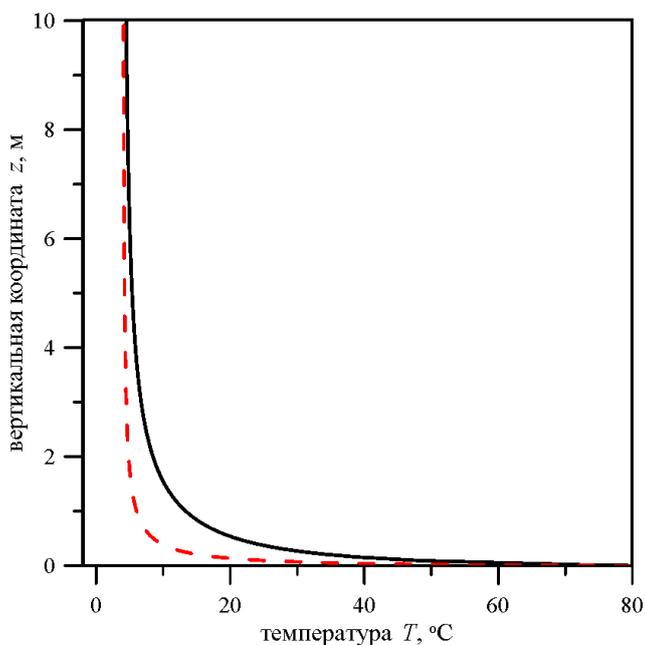


Рис. 2 – Зависимость температуры струи по вертикальной координате

На рисунке 3 представлен график изменения скорости струи с увеличением вертикальной координаты. Начальное значение соответствует скорости, с которой углеводороды поступают из поврежденного трубопровода. По мере распространения струи происходит «захват» окружающей воды, струя становится более тяжелой. Уменьшение скорости струи связано с утяжелением струи и уменьшением начального импульса струи.

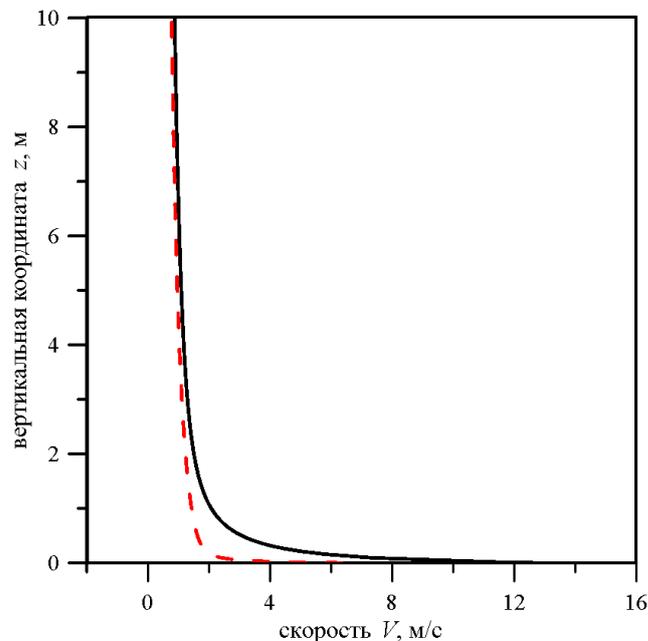


Рис. 3 – Зависимость скорости струи по вертикальной координате

### Заключение

В работе приводится уточненная математическая модель течения затопленной струи с учётом образования гидрата. Исследованы особенности течения многофазных и однофазных (газовых) струй, для расчета теплофизических параметров использован интегральный Лагранжевый метод. В результате расчетов получены зависимости температуры и скорости струи от вертикальной координаты.

Полученные в работе зависимости теплофизических параметров позволят спрогнозировать процесс миграции углеводородов, проанализировать какой глубины они достигнут и за какое время, каким будет состав струи и температура. Такие данные о струе являются особенно важными для процесса ликвидации утечек и могут быть использованы для моделирования работы устройств для ликвидации утечек.

### Финансирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-31-00264 мол\_a.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Funding

The study was carried out with the financial support of the Russian Federal Property Fund in the framework of the scientific project No. 18-31-00264 mol\_a.

### Conflict of Interest

None declared.

### Список литературы / References

1. Akhmetov R.R. Oil spills from offshore drilling and development: causes and effects on plants and animals / Akhmetov R.R., Krainov S.A. // European Science. – 2017. – № 8 (30). – P. 16-21.
2. Gimaltdinov I.K. On the theory of accumulation of hydrocarbons in a dome used to eliminate a technogenic spill at the bottom of the ocean / Gimaltdinov I.K., Kildibaeva S.R. // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2018. – Vol. 91. – № 1. – P. 246-251.
3. Gimaltdinov I.K. About the theory of initial stage of oil accumulation in a dome-separator / Gimaltdinov I.K., Kildibaeva S.R. // Thermophysics and Aeromechanics. – 2015. – Vol. 22. № 3. – P. 387-392.
4. Gimaltdinov I.K. Model of a submerged jet accounting for two limiting schemes of hydrate formation / Gimaltdinov I.K., Kildibaeva S.R. // Thermophysics and Aeromechanics. – 2018. – Vol. 25. № 1. – P. 75-83.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.90.12.005>**О МЕХАНИЗМЕ ПРОЦЕССОВ ТЯГОТЕНИЯ**

Научная статья

**Кораблев Г.А. \***

Ижевская государственная сельскохозяйственная академия, Ижевск, Россия

\* Корреспондирующий автор (korablevga[at]mail.ru)

**Аннотация**

Используя условие стационарного состояния в корпускулярно-волновых взаимодействиях и в рамках нерелятивистской механики проведен анализ механизма процессов тяготения. Получено уравнение функциональной зависимости постоянной тяготения от электрической постоянной. Предполагается, что тяготение есть волновой вклад от массы заряженных частиц при движении их в поле центральных сил.

**Ключевые слова:** механизм тяготения, условия стационарного состояния, корпускулярно-волновые процессы.

**ON GRAVITATION MECHANISM****Korablev G.A. \***

Research article

Izhevsk State Agricultural Academy, Izhevsk, Russia

\* Corresponding author (korablevga[at]mail.ru)

**Abstract**

The analysis of the gravitation process mechanism is carried out using the condition of a stationary state in wave-particle interactions and within the framework of non-relativistic mechanics. The author obtained an equation of the functional dependence of the constant of gravity on the electric constant. It is assumed that gravity is the wave contribution from the mass of charged particles when they move in the field of central forces.

**Keywords:** gravity mechanism, conditions of the stationary state, particle-wave processes.

**Введение**

По классической теории тяготения Ньютона сила  $F$  гравитационного притяжения между двумя материальными точками с массами  $m_1$  и  $m_2$ , разделёнными расстоянием  $r$ , действует вдоль соединяющей их прямой, пропорциональна обеим массам и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними[1]. То есть:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (1)$$

Здесь  $G$  — гравитационная постоянная, равная  $6,67408(31) \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2)$ .

Если поле создаётся расположенной в начале координат точечной массой  $M$ , гравитационный потенциал определяется формулой:

$$\varphi(\vec{r}) = -G \frac{M}{r} \quad (2)$$

В общем случае, когда плотность вещества  $\rho$  распределена произвольно,  $\varphi$  удовлетворяет уравнению Пуассона:

$$\Delta \varphi(\vec{r}) = -4\pi G \rho(\vec{r}) \quad (3)$$

Уравнения Ньютона и Пуассона в рамках нерелятивистской механики позволяют с большой точностью предсказывать движение небесных тел. В тоже время Ньютонская модель является чисто математической без какого либо физического содержания[2].

Известно так же, что масса гравитационная и инертная – это одна и та же физическая величина, определяющая разные явления, но динамику которых еще нужно исследовать[3], [4].

Общая теория относительности Эйнштейна (ОТО) объясняет физическую сущность тяготения на основе понятия об изменении геометрических свойств и искривления 4-мерного пространства-времени. В «слабых» гравитационных полях уравнения тяготения Эйнштейна сводятся к уравнению тяготения Ньютона[5].

Однако по современным представлениям «название ОТО является не адекватным и постепенно исчезает из литературы, заменяясь на теорию тяготения» [6]. Появились новые теории, уточняющие исходные принципы ОТО. Наиболее фундаментальной является квантовая теория гравитации[7], но она пока не считается законченной. Тяготение – единственное фундаментальное взаимодействие, по которому пока не построена общепризнанная непротиворечивая теория.

«Применение принципа корпускулярно-волнового дуализма к гравитационному полю показывает, что гравитационные волны можно рассматривать как поток квантов поля — гравитонов. С точки зрения квантовой гравитации, гравитационное взаимодействие осуществляется путём обмена виртуальными гравитонами между взаимодействующими телами»[2].

Идея использования принципов корпускулярно-волнового дуализма для объяснения процессов тяготения через понятие о поле гравитонов [1], [2] представляется наиболее рациональной, хотя предстоит найти основные закономерности механизма этого явления.

Таким образом, проблема физической природы сил тяготения с позиции нерелятивистской механики нуждается в дальнейшем исследовании. В данной работе делается попытка анализа таких проблем на основе представления о градиенте направленности корпускулярно-волновых процессов в системах различной природы.

**Исходные данные**

В работе [8] было получено:

1. В системах, в которых взаимодействие идет по градиенту потенциала (положительная работа) результирующая потенциальная энергия, как и приведенная масса, находятся по принципу сложения обратных значений соответствующих величин подсистем. Это – корпускулярный процесс, теоретической концепцией которого может являться энтропия.

2. В системах, в которых взаимодействие идет против градиента потенциала (отрицательная работа) выполняется алгебраическое сложение их масс и также соответствующих энергий подсистем. Это – волновой процесс, теоретической концепцией которого может являться неэнтропия.

3. Резонансное стационарное состояние систем выполняется при условии равенства степеней их корпускулярных и волновых взаимодействий. Продукция энтропии в стационарном состоянии полностью компенсируется потоком неэнтропии

4. Приведенные выше положения являются закономерным следствием первого начала термодинамики, анализ которого приведен в работе [8].

Применительно к корпускулярно волновым процессам условие динамического стационарного состояния есть условие равенства их степеней структурных взаимодействий:

$$\rho_k = \rho_v \tag{4}$$

Математически и графически (по номограммам) стационарное состояние выполняется по уравнению:

$$\ln\left(\frac{\rho}{\alpha}\right) = \text{tg}\varphi \tag{5}$$

Где,  $\varphi = 54^\circ 44'$  - геодезический угол,

$\alpha$  – относительная разность энергетических параметров взаимодействующих систем. Так, например, для постоянной тонкой структуры это уравнение имеет вид:

$$\ln\left(\alpha \frac{P_p}{P_e}\right) = \text{tg}\varphi \tag{6}$$

Здесь:  $P_p = W_p$ ,  $R = 938.2756$  МэВ  $\times$   $0.856$  фм =  $803,107$  МэВфм,

$P_e = W_e$   $r = 1.43998$  МэВфм,

$\alpha$  - постоянная тонкой структуры,

$P_p$  и  $P_e$  - энергетические параметры свободных протона и электрона,

$W_p$  и  $W_e$  - их энергетические массы,

$R$  – размерная характеристика протона,

$r$  – классический радиус электрона.

Аналогично были получены уравнения для числа  $\pi$ :

$$\ln\left(\frac{4\pi}{3}\right) = \text{tg}\varphi \tag{7}$$

$$\ln\left(\frac{4\pi^2}{g}\right) = \text{tg}\varphi \tag{8}$$

Где  $g$  – ускорение свободного падения.

Таким образом, равенство корпускулярных и волновых взаимодействий определяет резонансное стационарное состояние системы. Это условие соответствует наиболее оптимальным технологическим вариантам и широко проявляется в природе, а также во фрактальных системах.

**Корпускулярно-волновой механизм тяготения**

При вращательном движении твердого тела (или математической точки) вокруг неподвижной оси вектор полного ускорения ( $\vec{a}$ ) состоит из двух составляющих векторов: центростремительного ускорения ( $\vec{a}_n$ ) и касательного ускорения ( $\vec{a}_\tau$ ) - рисунок 1.

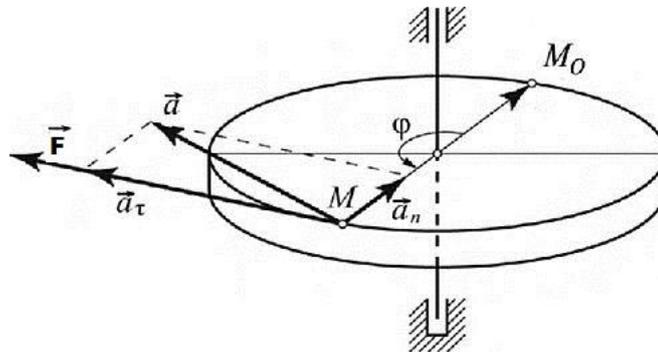


Рис. 1 – Кинематические характеристики вращательных движений

Вектор центростремительного ускорения при неподвижной оси вращения направлен к ней, то есть по градиенту поля. Это корпускулярная часть движения. Вектор касательного ускорения направлен от системы по касательной к траектории, то есть против градиента поля – это волновая часть движения. При равномерном вращении соотношения этих ускорений:

$$a_n/a_t=2\pi$$

Корпускулярно-волновой принцип такого вращательного движения подтверждается уравнением (7).

При аналогичном движении заряженных частиц происходит одновременно перенос ее массы и перенос заряда. Так в электродиффузионном уравнении переноса заряженных частиц общая интенсивность потока (J) равна сумме интенсивностей переноса массы и переноса заряда:

$$J = J_m + J_q$$

$$J = -D \frac{dC}{dx} - \sigma \frac{d\phi}{dx}$$

Где  $dC/dx$  – градиент концентрации,  $d\phi/dx$  – градиент потенциала.

В соответствии с условием стационарного состояния (п.3 исходных данных) действие корпускулярной составляющей определяет появление волновой части процесса. Так круговое движение зарядов (корпускулярный процесс) дает магнитное поле с его полюсами (волновой процесс). При аналогичном движении массы заряженной частицы (корпускулярный процесс) должно возникать потенциальное поле (волновой процесс). Можно предположить, что такое поле является гравитационным, но тогда должно выполняться определенное соотношение между постоянной тяготения и электрической постоянной. Поэтому применительно к кинематике механических систем и сохраняя формализм уравнения (5) получаем:

$$\ln\left(\frac{G}{\epsilon_0}\right) = \text{tg}^2(a_0\phi) \tag{10}$$

Где,  $\epsilon_0$  - электрическая постоянная,

$a_0 = 1,00233$  – квантовая поправка к гиромангнитному отношению электрона в атоме, которая возможно в данном случае характеризует влияние прецессии движения частиц. Данное уравнение выполняется с отклонением от исходного значения  $\phi$  на 0,015%.

Таким образом, уравнение (10) подтверждает предположение о том, что волновой вклад массы заряженной частицы определяет наличие гравитационного поля.

Поэтому сходство уравнений Кулона и Ньютона не является формальным, а имеет физическое обоснование. Кроме того равенство гравитационной и инертной массы определяется равенством соответствующих корпускулярных и волновых составляющих. Так: «Если ни от тяготения, ни от инерции избавиться нельзя, можно попробовать считать инерцию и тяготение разными сторонами одного и того же процесса» [9].

Практически есть другой вариант формулы (10):

$$K=2= \text{tg}^2\phi \tag{11}$$

Где K – соотношение исходных корпускулярных и волновых характеристик в данной системе. Возможно, это уравнение для тех случаев, когда исходные характеристики процесса прямо или косвенно уже учитывали логарифмические зависимости.

В работах [10], [11] используется понятие разрушающего напряжения при растяжении пластика нити на шаг ее намотки:  $\sigma_\alpha$  – осевое,  $\sigma_\beta$  – окружное напряжения, которые заменяются пропорциональной им величиной  $N_\alpha$  – осевое «усилие» и  $N_\beta$  – окружное «усилие». При этом выполняется уравнение:

$$\frac{\sigma_\beta}{\sigma_\alpha} = \frac{N_\beta}{N_\alpha} = \text{tg}^2\phi = 2 \tag{12}$$

«Это условие позволяет получать равнонапряженную систему нитей с минимальной массой изделия» [10], [11].

В квантовой механике отношение магнитного момента частицы к ее механическому моменту называется магнитомеханическим (гиромагнитным) отношением –  $g$ . При этом  $g_s \approx 2$ , если магнитный момент электрона обусловлен только спиновой составляющей и  $g = 1$ , если он создается орбитальным движением электронов. Их соотношение  $g_s / g \approx 2$  и  $tg^2\varphi = 2$  характеризуют соответствующие корпускулярно-волновые зависимости. Более точно с квантовой поправкой  $g_s / g = 2, 00233$ .

Сила тяготения не зависит от химического состава тел или частиц. Каждое тело состоит из множества частиц в общем случае разных по природе и по размерам. При образовании гравитационного поля микросистемами, общим для всех структур представляется процесс протон-электронного взаимодействия под действием центральных сил. В неживой природе каждая система частиц, образующих данное тело может рассматриваться как закрытая. В ней гравитоны изначально имеют направление взаимодействия против градиента поля. В таких случаях (согласно п.2 исходных данных) идет прямое алгебраическое сложение их интенсивностей независимо от химического состава частиц, образующих массу тела. При этом результирующая интенсивность гравитонов прямо пропорциональна массе тела.

Но в живой природе каждая система является открытой, поэтому идут процессы взаимодействия ее с внешней средой, но с сохранением гравитонами специфических особенностей каждой частицы.

В любом живом организме выполняются сложные биоэлектрические процессы. Например, в молекуле ДНК при закручивании или раскручивании ее структурной спирали направление таких взаимодействий должно идти по геодезическому углу. Под таким же углом работает тутовый шелкопряд при наматывании шелковой нити на основу.

В динамике конформации ДНК большое значение имеют так же протон-электронные взаимодействия между подсистемами этой молекулы. Возникающие при этом гравитоны несут в себе энергетическую и генетическую информацию от каждой молекулы ДНК.

В виду специфичности и слабой интенсивности такого поля, оно не регистрируется обычными приборами, но может регистрироваться родственными системами, а так же такими системами, которые могут перестраиваться в резонанс с исходной. Очевидно, в этом и находится главная причина известных эффектов так называемой телепатии. Но это процесс биогравитации. В неживой природе в некоторых случаях, например, в космологии наряду с обычным взаимодействием может в небольшой степени проявляться взаимодействие по принципу открытых систем. Возможно, с наличием такого взаимодействия как-то связано известное по ОТО «искривление пространства».

#### Выводы

1. Используя условие стационарного состояния в корпускулярно-волновых взаимодействиях и в рамках нерелятивистской механики проведен анализ механизма процессов тяготения.

2. Получено уравнение функциональной зависимости постоянной тяготения от электрической постоянной.

3. Предполагается, что тяготение есть волновой вклад от массы заряженных частиц при движении их в поле центральных сил.

#### Конфликт интересов

Не указан.

#### Conflict of Interest

None declared.

#### Список литературы / References

1. Иваненко Д. Д. Гравитация / Иваненко Д. Д., Сарданашвили Г. А. М.: Едиториал УРСС, 2004, ISBN 5-354-00538-8
2. [Электронный ресурс] – URL: [https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=Классическая\\_теория\\_тяготения\\_Ньютона&oldid=101565038](https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=Классическая_теория_тяготения_Ньютона&oldid=101565038) (дата обращения: 13.11.19)
3. Физический энциклопедический словарь. М.: «Большая Российская Энциклопедия», т.3, 1992, 672 с.
4. Киттель Ч. Курс физики т.1 Механика / Киттель Ч., Найт У. Рудерман М. «Наука», 1971, 479с.
5. Физическая Энциклопедия, М.: «Советская Энциклопедия», т.1, 1988, 704 с.
6. Физический энциклопедический словарь. М.: «Советская Энциклопедия», т.5, 1966, 576 с.
7. Approaches to Quantum Gravity. Toward a New Understanding of Space, Time and Matter / Ed. by D. Oriti. — Cambridge: Cambridge University Press, 2009. — xix + 583 p. — ISBN 978-0-521-86045-1.
8. Korablev G.A. On problematic issues of physical chemistry / Korablev G.A., JMEST, v6, 2019, pp10320-10324
9. Угаров А. Специальная теория относительности / Угаров А. М.: «Наука», 1977, 385с.
10. Пидгайный Ю.М. Механика полимеров / Пидгайный Ю.М., Морозова В.М., Дудко В.А.– 1967.– № 6 – С. 1096-1104.
11. Кодолов В.И. Полимерные композиции и технология изготовления из них двигателей летательных аппаратов. Ижевский механический институт / Кодолов В.И. 1992, – 200 с.

#### Список литературы на английском языке / References in English

1. Ivanenko D. D. Gravitaciya [Gravity] / Ivanenko D. D., Sardanashevili G. A. M.: URSS editorial, 2004, ISBN 5-354-00538-8 [in Russian]
2. [Electronic resource] – URL: [https://ru.wikipedia.org/w/index.php?Title=Classical\\_the\\_gravitation\\_theory\\_Newton&oldid=101565038](https://ru.wikipedia.org/w/index.php?Title=Classical_the_gravitation_theory_Newton&oldid=101565038) (accessed: 13.11.19) [in Russian]
3. Fizicheskij enciklopedicheskiy slovar' [The physical encyclopedic dictionary]. M. : "Big Russian Encyclopedia", Vol. 3, 1992, 672 p. [in Russian]
4. Kittel H. Kurs fiziki t.1 Mekhanika [Physics course vol. 1 Mechanics] / Kittel H., Knight W., Ruderman M. Science, 1971, 479 pp. [in Russian]
5. Fizicheskaya Enciklopediya [Physical Encyclopedia], M. : "Soviet Encyclopedia", v.1, 1988, 704 p. [in Russian]

6. Fizicheskij enciklopedicheskij slovar' [Physical encyclopedic dictionary]. M.: "Soviet Encyclopedia", v.5, 1966, 576 p. [in Russian]
7. Approaches to Quantum Gravity. Toward a New Understanding of Space, Time and Matter [Approaches to Quantum Gravity. Toward a New Understanding of Space, Time and Matter] / Ed. by D. Oriti. - Cambridge: Cambridge University Press, 2009. -- xix + 583 p. - ISBN 978-0-521-86045-1. [in Russian]
8. Korablev G.A. On problematic issues of physical chemistry [On problematic issues of physical chemistry] / Korablev G.A., jimest, v6, 2019, pp10320-10324
9. Ugarov A. Special'naya teoriya otnositel'nosti [Special Theory of Relativity] / Ugarov A. . M.: "Science", 1977, 385p. [in Russian]
10. Pidgainy Yu.M. Mekhanika polimerov [The mechanics of polymers] / Pidgainy Yu.M., Morozova V.M., Dudko V.A. - 1967. – No. 6 - P. 1096-1104. [in Russian]
11. Kodolov V.I. Polimernye kompozicii i tekhnologiya izgotovleniya iz nih dvigatelej letatel'nyh apparatov. Izhevskij mekhanicheskij institute [Polymer compositions and manufacturing technology of aircraft engines from them] / Kodolov V.I. Izhevsk Mechanical Institute, 1992, - 200 p. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.90.12.006>

## ОСОБЕННОСТИ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ БУФЕРНЫХ СЛОЕВ $\text{CeO}_2$ НА $r\text{-Al}_2\text{O}_3$ ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ОСАЖДЕНИЯ

Научная статья

Носов А.П.<sup>1,\*</sup>, Дубинин С.С.<sup>2</sup>, Осотов В.И.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ORCID: 0000-0003-1475-0059;

<sup>1</sup> Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия;

<sup>1,2</sup> Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

\* Корреспондирующий автор (nossov[at]imp.uran.ru)

### Аннотация

В работе представлены результаты структурных исследований буферных слоев  $\text{CeO}_2$  выращенных методом импульсного лазерного осаждения на монокристаллических подложках из  $r\text{-Al}_2\text{O}_3$  ( $1\bar{1}02$ ) при температуре подложки  $750^\circ\text{C}$ . Экспериментально показано, что при изменении давления кислорода в процессе роста, в условиях сохранения неизменными остальных параметров роста, возможно получение буферных слоев с разной кристаллографической ориентацией: при давлении кислорода 0,002 мбар буферные слои имеют ориентацию (111), а при давлении кислорода 0,2 мбар – (002). Полученные результаты могут представлять интерес для получения эпитаксиальных пленок и наногетероструктур со слоями из высокотемпературных сверхпроводников и допированных манганитов на монокристаллических подложках  $r\text{-Al}_2\text{O}_3$  с буферными слоями из  $\text{CeO}_2$ .

**Ключевые слова:** тонкие пленки, импульсное лазерное осаждение,  $\text{CeO}_2$ ,  $r\text{-Al}_2\text{O}_3$ .

## FEATURES OF CRYSTALLOGRAPHIC STRUCTURE OF $\text{CeO}_2$ BUFFER LAYERS ON $r\text{-Al}_2\text{O}_3$ OBTAINED BY PULSE LASER DEPOSITION METHOD

Research article

Nosov A.P.<sup>1,\*</sup>, Dubinin S.S.<sup>2</sup>, Osotov V.I.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ORCID: 0000-0003-1475-0059;

<sup>1</sup> Federal State Budgetary Institution of Science, M.N. Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia;

<sup>1,2</sup> Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

\* Corresponding author (nossov[at]imp.uran.ru)

### Abstract

The paper presents the results of structural studies of  $\text{CeO}_2$  buffer layers grown by pulsed laser deposition on single-crystal substrates of  $r\text{-Al}_2\text{O}_3$  ( $1\bar{1}02$ ) at a substrate temperature of  $750^\circ\text{C}$ . It was shown experimentally that when the oxygen pressure changes during growth, while maintaining the remaining growth parameters unchanged, it is possible to obtain buffer layers with different crystallographic orientations: at an oxygen pressure of 0.002 mbar, the buffer layers have an orientation of (111), and at an oxygen pressure of 0.2 mbar – (002). The results obtained may be of interest for the preparation of epitaxial films and nanoheterostructures with layers of high-temperature superconductors and doped manganites on  $r\text{-Al}_2\text{O}_3$  single-crystal substrates with  $\text{CeO}_2$  buffer layers.

**Keywords:** thin films, pulsed laser deposition,  $\text{CeO}_2$ ,  $r\text{-Al}_2\text{O}_3$ .

### Введение

Получение высококачественных тонких пленок новых функциональных материалов и исследование их свойств является актуальной задачей современной фундаментальной и прикладной науки. Важную роль среди перспективных материалов играют сложные оксидные соединения с псевдокубической кристаллографической структурой такие как купратные высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) составов  $(\text{A})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ , где А – редкоземельные элементы, и допированные манганиты с колоссальным магнитосопротивлением составов  $\text{A}_{1-x}\text{B}_x\text{MnO}_3$ , где А = Ca, Sr, Ba, Pb.

Рост тонких пленок сложных оксидных соединений с совершенной кристаллографической структурой возможен на монокристаллических подложках с близкими параметрами постоянных решетки, таких как  $\text{SrTiO}_3$ ,  $\text{LaAlO}_3$  и других. Однако такие подложки довольно дороги и их сложно получить в виде пластин больших размеров. Поэтому представляет большой интерес изучение особенностей роста и разработка технологий получения тонких пленок перечисленных сложных оксидных соединений на подложках, выпуск которых освоен в промышленных масштабах, например, сапфире ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) с гексагональной структурой. Из-за различий в типах кристаллических решеток получение структурно совершенных тонких пленок с псевдокубической кристаллографической структурой на подложках из  $\text{Al}_2\text{O}_3$  невозможно. При нанесении на подложку с одной кристаллической структурой тонких буферных слоев с другой кристаллической структурой, соответствующей структуре выращиваемой пленки, рост высококачественных пленок можно реализовать только в определенных условиях. Подбор комбинаций материалов в системе пленка/буферный слой/подложка является достаточно сложной задачей. Однако, оказывается возможным выращивание тонких пленок сложных оксидов с псевдокубической кристаллографической структурой на буферных слоях  $\text{CeO}_2$ , которые, в свою очередь, можно вырастить на подложках из  $r\text{-Al}_2\text{O}_3$  с кристаллографической ориентацией ( $1\bar{1}02$ ).

Величина постоянной решетки кубического  $\text{CeO}_2$  составляет 0,541 нм и близка к соответствующим значениям постоянных решетки  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ . Степень рассогласования для осей  $a$ ,  $b$  и  $c$  составляет 0,15, 1,4 и 1,7% соответственно. Хорошие диэлектрические свойства  $\text{Al}_2\text{O}_3$  делают структуры ВТСП/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  чрезвычайно привлекательными для разработки приборов и устройств, работающих в микроволновом диапазоне частот. Поэтому рост ВТСП пленок на подложках из  $r\text{-Al}_2\text{O}_3$  с буферным слоем из  $\text{CeO}_2$  уже достаточно давно привлекает интерес исследователей. В работе [5] было показано, что помимо диэлектрических подложек слоя  $\text{CeO}_2$  высокого качества можно выращивать и на металлических подложках с кубической структурой, пригодных для изготовления ВТСП кабелей второго поколения [6]. Как показано в работе [7] помимо ВТСП материалов на подложках с буферными слоями  $\text{CeO}_2$  возможно также выращивать тонкие пленки допированных манганитов с колоссальным магнитосопротивлением.

Рост буферных слоев  $\text{CeO}_2$  можно осуществлять такими методами, как магнетронное распыление [8], молекулярно-лучевая эпитаксия [9], импульсное лазерное осаждение [10]. Последний метод нашел наиболее широкое применение.

В общем случае буферные слои  $\text{CeO}_2$  на подложках из  $r\text{-Al}_2\text{O}_3$  могут характеризоваться сложной кристаллографической структурой, в рентгенодифракционных спектрах которой будет присутствовать несколько пиков, соответствующие различным кристаллографическим ориентациям (hkl), где значения h, k, l могут равняться нулю или натуральному числу. Получение слоев с какой-то одной ориентацией требует тщательного подбора параметров режима роста. При импульсном лазерном осаждении этими параметрами являются: длина волны лазерного излучения, энергия в импульсе, расстояние мишень – подложка, температура подложки, давление газа в процессе роста, режимы термообработки как в процессе, так и по окончании роста. Крайне желательным является возможность управления кристаллографической структурой выращиваемых буферных слоев путем изменения какого-то одного параметра роста.

В настоящей работе представлены результаты рентгенографического исследования кристаллической структуры буферных слоев  $\text{CeO}_2$ , на подложках из  $r\text{-Al}_2\text{O}_3$ , полученных импульсным лазерным осаждением. Показано, что только изменением давления кислорода в процессе роста, при сохранении остальных параметров роста неизменными, удается получать слои с ориентацией (111) при низком давлении и с ориентацией (002) при высоком давлении.

#### Эксперимент

Буферные слои  $\text{CeO}_2$  выращивали на монокристаллических подложках из  $r\text{-Al}_2\text{O}_3$  ( $1\bar{1}02$ ) методом импульсного лазерного осаждения. Поликристаллическую мишень из  $\text{CeO}_2$  приготавливали методом твердофазного синтеза с контролем фазового состава рентгенодифракционным методом. Осаждение материала мишени на подложку осуществляли в экспериментальной установке с использованием KrF эксимерного лазера модели CL7020 производства компании «Оптосистемы» (г.Троицк, Московской области). Использовалось излучение с длиной волны  $\lambda = 248$  нм, энергию в импульсе можно было регулировать до уровня 400 мДж. Длительность импульсов составляла 20 нс, частота следования – 5 Гц. Излучение лазера фокусировали на мишени системой формирования и сканирования пучка в область площадью 0,5 мм<sup>2</sup>. Для получения пленок фиксировали энергию в импульсе и количестве импульсов (5000). В процессе осаждения температуру подложки поддерживали равной 750С. Расстояние мишень - подложка составляло 35 мм. Была получена серия образцов при давлениях кислорода 0,2, 0,02 и 0,002 мбар в условиях, когда остальные параметры роста оставались неизменными. Из-за зависимости скорости роста от давления толщина полученных буферных слоев составила от 9 до 57 нм для образцов, полученных при давлениях 0,2 и 0,002 мбар, соответственно. Толщину слоев измеряли с использованием оптического профилометра ZYGO New View.

Рентгеноструктурные исследования выполняли на специализированном дифрактометре с использованием  $\text{Cu}_{K\alpha}$  излучения. Все измерения были выполнены при комнатной температуре.

#### Результаты и обсуждение

На Рис.1. представлены участки дифрактограмм буферных слоев  $\text{CeO}_2$  на  $r\text{-Al}_2\text{O}_3$  выращенных при давлениях кислорода 0,002, 0,02 и 0,2 мбар и энергии в импульсе 350 мДж. Изменение давления кислорода в процессе роста, при неизменных остальных параметрах, сильно влияет на кристаллографическую структуру получаемых слоев. При малом давлении кислорода слои имеют ориентацию (111), при промежуточном давлении 0,02 мбар слои характеризуются структурой со сложной ориентацией, а при большом давлении - имеют ориентацию (002). На вставке показана зависимость отношения интенсивностей пиков  $I(002)/I(111)$  от давления кислорода в процесса роста.

Аналогичная зависимость отношения интенсивностей пиков  $I(002)/I(111)$  от давления была получена и для пленок, выращенных при использовании лазерного излучения с энергией в импульсе 200 мДж.

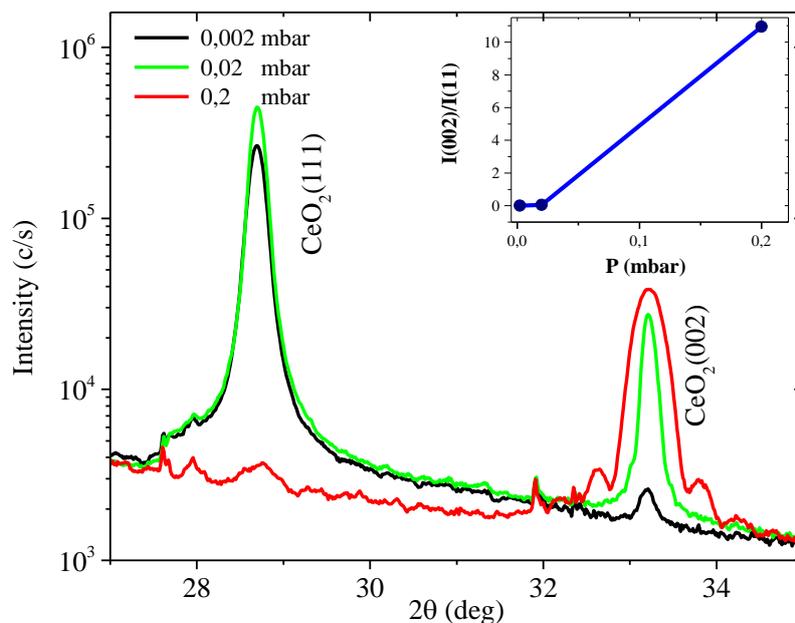


Рис.1 – Участки дифрактограмм буферных слоев  $\text{CeO}_2$  на  $r\text{-Al}_2\text{O}_3$  выращенных при давлениях кислорода 0,002, 0,02 и 0,2 мбар. На вставке – отношение интенсивностей пиков  $I(002)/I(111)$

Наблюдаемые закономерности могут быть объяснены с учетом влияния давления кислорода на кинетику окисления церия на поверхности подложки в процессе роста. Процесс импульсного лазерного осаждения не является термодинамически равновесным. После воздействия лазерного импульса на мишень поступление материала мишени на подложку происходит с небольшой задержкой на время пролета промежутка мишень – подложка. В ходе этого процесса давление кислорода в области подложки может отличаться от общего давления в камере. Эти различия могут приводить к преимущественному росту слоев с ориентацией (002) при лучших окислительных условиях.

Полученные результаты согласуются с данными работ [9], в которой в качестве окислительной среды использовали как молекулярный кислород, так и кислород с ионизацией ВЧ разрядом непосредственно в камере роста. При росте в условиях дополнительной ионизации получали слои с преимущественной ориентацией (002).

В случае импульсного лазерного осаждения возможность изменения кристаллографической ориентации буферных слоев  $\text{CeO}_2$  на  $r\text{-Al}_2\text{O}_3$  путем изменения только давления кислорода в процессе роста представляет большой интерес для получения тонких слоев и наногетероструктур на основе ВТСП материалов и допированных манганитов.

#### Заключение

Исследовано влияние давления кислорода на кристаллографическую ориентацию буферных слоев  $\text{CeO}_2$  на монокристаллических подложках из  $r\text{-Al}_2\text{O}_3$  выращенных методом импульсного лазерного осаждения. Показано, что при остальных неизменных параметрах роста при давлении кислорода 0,002 мбар буферные слои имеют ориентацию (111), а при давлении кислорода 0,2 мбар – (002). Такая зависимость по-видимому обусловлена влиянием давления кислорода на кинетику окисления церия на поверхности подложки в процессе роста. Результаты могут представлять интерес для получения высококачественных эпитаксиальных пленок высокотемпературных сверхпроводников и допированных манганитов на монокристаллических подложках из  $\text{CeO}_2/r\text{-Al}_2\text{O}_3$ .

#### Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (тема «Спин», № АААА-А18-118020290104-2).

#### Funding

The research was carried out within the state assignment of Ministry of Education and Sciences of Russia (theme “Spin” No. АААА-А18-118020290104-2),

#### Конфликт интересов

Не указан.

#### Conflict of Interest

Non declared

#### Список литературы / References

1. Sakuma K. Trifluoroacetate metal organic deposition derived  $(\text{Y}_{0,77}\text{Gd}_{0,23})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  films on  $\text{CeO}_2$  buffered R-plane  $\text{Al}_2\text{O}_3$  substrates / Sakuma K., Sato M., Miura M. // Japanese J.Appl.Phys. – 2018. – Vol.57. – No.3. – P. 033102.
2. Sekiya N. Temperature dependence of power handling capability of HTS filter with double-strip resonator / Sekiya N., Fujihara, K. // Physica C – Superconductivity and its Applications. – 2016. – Vol.560. P.117-119.
3. Sekiya N. Design of high-order HTS dual-band bandpass filters with receiver subsystem for future mobile communication systems / Sekiya N. // Physica C – Superconductivity and its Applications. – 2016. – Vol.527. P.91-97.
4. Ota Y. Relationship between superconducting properties of  $\text{EuBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  thin films and surface morphology of  $\text{CeO}_2$  buffer layers on  $r\text{-Al}_2\text{O}_3$  / Ota Y., Sakuma K., Kimura Y. et al // Physica C – Superconductivity and its Applications. – 2006. – Vol.445. – P.849-852.

5. Nosov A. P. Structure of Buffer CeO<sub>2</sub> and LaNiO<sub>3</sub> Layers Prepared by Method of Pulsed Laser Deposition on Textured Ni–Cr–W Substrates / Nosov A. P., Krinitsina T. P., Kuznetsova E. I. et al // The Physics of Metals and Metallography. - 2013. - Vol.114. - No.10. - P.845–850.
6. Schastlivtsev V.M. Nickel Alloy Substrates with a Sharp Cube Texture for High-Tc Superconducting Tapes / Schastlivtsev V.M., Ustinov V.V., Rodionov D.P. et al // Doklady Physics. - 2004. - V.49. - No.3. - P.167–170.
7. Perna P. High Curie temperature for La<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>MnO<sub>3</sub> thin films deposited on CeO<sub>2</sub>/YSZ-based buffered silicon substrates / Perna P., Mechin L., Chauvat M.P. et al // J.Phys.:Condens. Matter. – 2009.- Vol.21. - 306005 (5pp).
8. Kimura Y. EuBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> films grown on vicinal R-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> substrates with CeO<sub>2</sub> buffer layers by magnetron sputtering / Kimura Y., Michikami O., Fujiwara S. et al // Physica C – Superconductivity and its Applications. – 2008. – Vol.468. – No.15-20. - P.1847-1850.
9. Kurian J. Growth of epitaxial CeO<sub>2</sub> thin films on r-cut sapphire by molecular beam epitaxy / Kurian J., Naito M. // Physica C – Superconductivity and its Applications. – 2004. – Vol.402. – P.31-37.
10. Boikov Yu. A. High tunability of the permittivity of heterostructures on sapphire substrates / Boikov Yu. A., Claeson T. // Journal of Applied Physics. – 1997. -Vol.81. - P.3232-3236.

**ИСКРОВОЕ ПЛАЗМЕННОЕ СПЕКАНИЕ МЕДНО-АЛМАЗНЫХ КОМПОЗИТОВ: ВЛИЯНИЕ МОРФОЛОГИИ ПОКРЫТИЯ В<sub>4</sub>С НА ПОВЕРХНОСТИ АЛМАЗОВ**

Научная статья

**Савостьянов А.В.<sup>1</sup>, Московских Д.О.<sup>2</sup>, Логинов П.А.<sup>3</sup>, Воротыло С.<sup>4,\*</sup>, Бардасова К.В.<sup>5</sup>**<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup> Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

\* Корреспондирующий автор (stepan.vorotylo[at]gmail.com)

**Аннотация**

Медно-алмазные композиты были получены с помощью искрового плазменного спекания. Для улучшения свойств композита на поверхности алмазных зерен путем реактивного отжига были получены покрытия В<sub>4</sub>С различной морфологии (гладкие или игольчатые). В случае игольчатой морфологии В<sub>4</sub>С покрытий, полученный искровым плазменным спеканием материал продемонстрировал самые высокие прочность на изгиб (до 320 МПа) и теплопроводность (680 Вт/м\*К). Применение покрытий на основе карбида бора с оптимизированной морфологией перспективно для изготовления медно-алмазных теплоотводов с высокими техническими характеристиками.

**Ключевые слова:** медно-алмазные композиты, карбид бора, покрытия на алмазах.

**SPARK PLASMA SINTERING OF COPPER-DIAMOND COMPOSITES: EFFECT OF MORPHOLOGY OF В<sub>4</sub>С COATING ON SURFACE OF DIAMONDS**

Research article

**Savostyanov A.V.<sup>1</sup>, Moskovskikh D.O.<sup>2</sup>, Loginov P.A.<sup>3</sup>, Vorotylo S.<sup>4,\*</sup>, Bardasova K.V.<sup>5</sup>**<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup> National Research Technological University Moscow Institute of Steel and Alloys, Moscow, Russia

\* Corresponding author (stepan.vorotylo[at]gmail.com)

**Abstract**

Copper-diamond composites were obtained using spark plasma sintering. To improve the properties of the composite on the surface of diamond grains by reactive annealing, В<sub>4</sub>С coatings of various morphologies (smooth or needle) were obtained in this work. In the case of needle morphology of В<sub>4</sub>С coatings, the material obtained by spark plasma sintering showed the highest bending strength (up to 320 MPa) and thermal conductivity (680 W/m\*К). The use of coatings based on boron carbide with optimized morphology is promising for the manufacture of copper-diamond heat sinks with high technical characteristics.

**Keywords:** copper-diamond composites, boron carbide, coatings on diamonds.

**Введение**

Армированные алмазами металлические композиты используют в качестве инструментов для механической обработки (режущие круги, сверла для резки бетона, бурения тоннелей, нефтеразведки) [1] и в качестве теплоотводов в высокоомощной электронике [2]. Свойства этих композитов в значительной степени зависят от связывания между алмазами и металлической матрицей.

Поскольку медь обладает самой высокой теплопроводностью среди не-драгоценных металлов, она лучше всего подходит в качестве металлической матрицы для композитных теплоотводов. Однако медь не смачивает алмаз и не реагирует с ним, что препятствует образованию связей между алмазом и матрицей и вредно как для механических, так и для проводящих свойств медно-алмазных композитов [3], [9]. Эта проблема может быть минимизирована легированием композита карбидообразующими элементами (Cr, Mo, В и т.д.) [7], [10], [11]. Легирование медной матрицы бором увеличивает теплопроводность композита, но оказывает вредное воздействие на его механические свойства [3], [12]. Нанесение борных покрытий непосредственно на поверхность алмазов является более эффективным способом повышения свойств медно-алмазных сплавов [5]. Бор реагирует с алмазом и образует В<sub>4</sub>С [13], который лучше совместим с медной матрицей нежели бор и алмаз [1].

Такие композиты демонстрируют значительное увеличение как механических, так и проводящих свойств [1]. Кроме того, В<sub>4</sub>С покрытия значительно повышают стойкость алмаза к окислению при температурах до 1000° С и обеспечивают залечивание микротрещин при окислении. [13]

Было показано, что комбинация предварительной обработки алмазов бором и последующего искрового плазменного спекания (SPS) является одним из наиболее эффективных способов получения медно-алмазных композитов с покрытиями В<sub>4</sub>С. [14] Однако, влияние морфологии В<sub>4</sub>С покрытия на свойства медно-алмазных композитов еще не исследовано.

Целью данной работы являлось улучшение прочности на изгиб и теплопроводности полученных искровым плазменным спеканием медно-матричных композитов за счет оптимизации морфологии покрытия В<sub>4</sub>С на поверхности алмазов.

**Материалы и методы**

В данной работе использовали синтетические алмазы MDB-4 с размером ~75 мкм (Henan Jinbei Special Type Diamond Co., Китай). На алмазы наносили покрытие В<sub>4</sub>С посредством отжига в смеси 50%С<sub>алм</sub> + 35% В + 15% Н<sub>3</sub>В<sub>О</sub><sub>3</sub>. Алмазы, аморфный черный бор (Grade II, Н.С. Starck) и борная кислота (квалификация ХЧ, Spectrum Chemicals) смешивали в смесителе Турбула в течение 5 часов, затем отжигали в трубчатой прозодной печи в токе аргона в течение 60-360 мин при температуре 800-1100 °С, после чего продукты отжига обрабатывали 10% растворов HCl (80

$^{\circ}\text{C}$ , 8 часов) с интенсивным перемешиванием для удаления непрореагировавшего оксида бора. Химические превращения при отжиге изучали методами дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) и термогравиметрического анализа (ТГА) на установке MicroCal Auto-iTC200 (Malvern Panalytical, Великобритания). Морфологию и фазовый состав обработанных алмазов изучали с помощью сканирующей электронной микроскопии (JEOL JSM6610LV, Япония) и Рамановской спектроскопии (Thermo DXR Raman Microscope, США).

Алмазы покрытые  $\text{B}_4\text{C}$  (50 об.%) мешали с порошком меди (50 об.%) в смесителе Турбула в течение 5 часов. Медь-алмазные композиты консолидировали методом искрового плазменного спекания на установке Labox 650 (Sinter Land, Япония) при температуре  $900^{\circ}\text{C}$ , давлении 50 МПа и продолжительности выдержки 10 мин. Температуропроводность медно-алмазных композитов измеряли методом лазерной вспышки (LFA 447 HyperFlash, Германия). Относительную плотность консолидированных образцов измеряли методом Архимеда (теоретическая плотность равна  $6,24 \text{ г/см}^3$ ). Теплопроводность рассчитывали на основании температуропроводности, теплоемкости и плотности композитов.

### Результаты и их обсуждение

Рисунок 1 демонстрирует результаты ДСК/ТГА исследования процесса отжига. Колебания теплового потока в начале отжига совпадают с активной потерей массы и обозначают разложение  $\text{H}_3\text{BO}_3$ . Пики теплового потока около  $\approx 500^{\circ}\text{C}$  (50 минут отжига) соответствуют началу реакции между бором и алмазом. Однако после 50 минут на отметке в  $800^{\circ}\text{C}$  вес образца не испытал существенных изменений, в то время как при  $1100^{\circ}\text{C}$  образец постепенно терял массу, по-видимому, из-за образования легко испаряющегося  $\text{B}_2\text{O}_2$  (зеленая линия на рисунках 1 а, б).

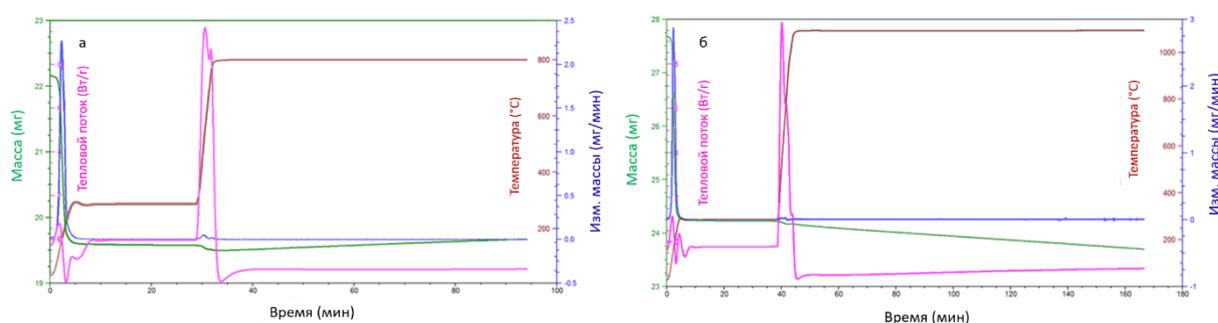


Рис. 1 – Результаты ДСК/ТГА исследования смеси алмаз+В+  $\text{H}_3\text{BO}_3$  при  $800^{\circ}\text{C}$  (а) и при  $1100^{\circ}\text{C}$  (б)

Морфология покрытия  $\text{B}_4\text{C}$  на алмазных частицах значительно меняется в зависимости от температуры отжига (Рисунок 2). Покрытие, нанесенное при  $800^{\circ}\text{C}$ , состояло из мелких остроконечных зерен  $\text{B}_4\text{C}$  (Рисунок 2 г). Шероховатость поверхности  $R_{\text{max}}$  составляла  $\approx 2 \text{ мкм}$  (Рисунок 2 д). Между тем, покрытие, полученное при  $1100^{\circ}\text{C}$  (Рисунок 2 б,в) содержало многочисленные иглы  $\text{B}_4\text{C}$  с длиной до 15 мкм и диаметром 0.5-1 мкм. Поэтому  $R_{\text{max}} \approx 20 \text{ мкм}$  – на порядок выше, чем для покрытия, полученного при  $800^{\circ}\text{C}$ .

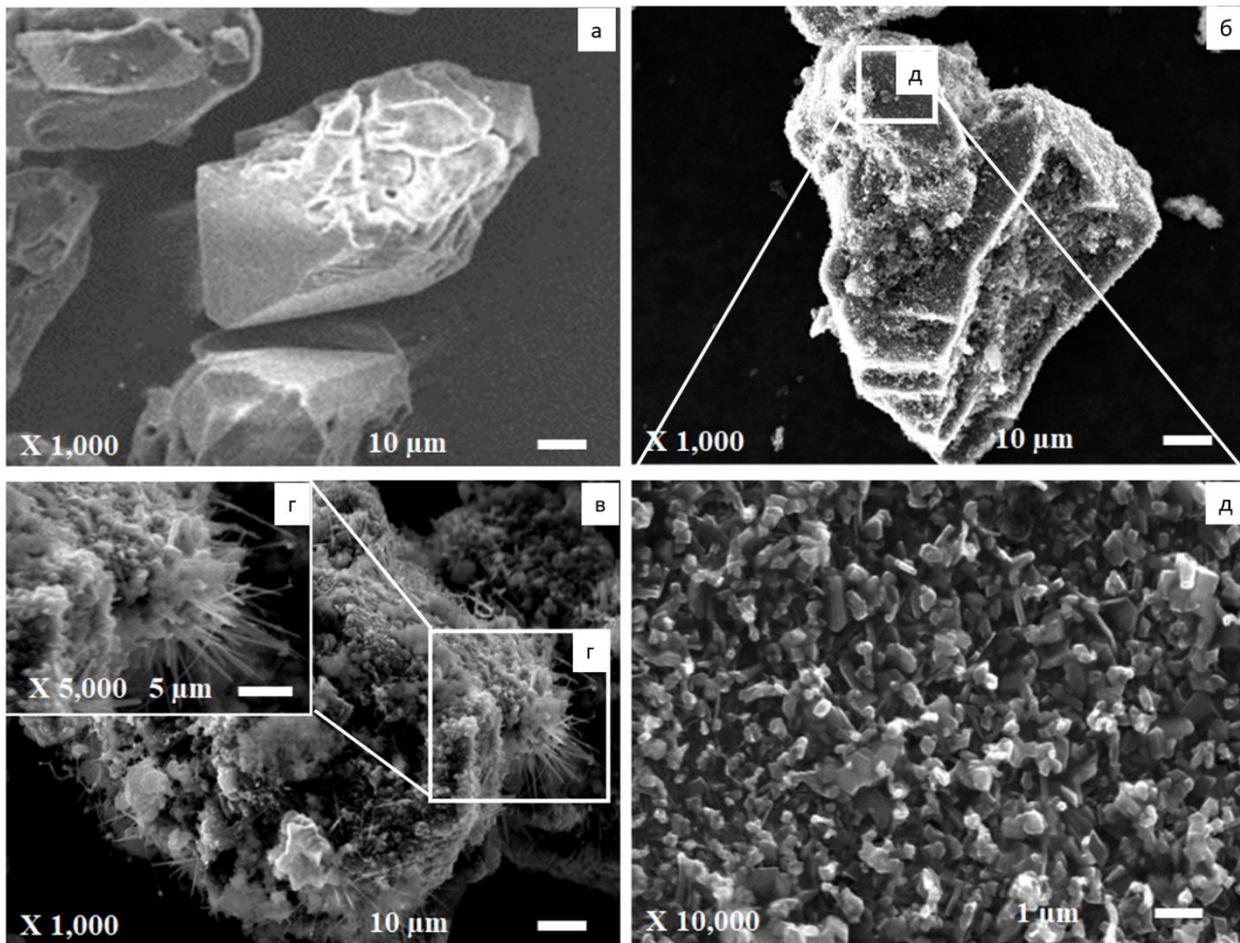


Рис. 2 – СЭМ изображение непокрытых алмазов (а), алмазов с покрытием покрытых частиц при 1100 °С (б,в), покрытых частиц при 800 °С (г,д). Продолжительность нанесения покрытия - 360 мин

Это различие в морфологии и шероховатости поверхности можно характеризовать различиями в задействованных диффузионных механизмах. Газофазный перенос бора в виде  $B_2O_2$  и углерода в виде  $CO$  может вызвать рост игольчатых  $B_4C$  по механизму пар-кристалл (Рисунок 2 в). При этом кристаллизация из жидкого  $B_2O_3$  или твердофазная диффузия может привести к образованию ограниченных зерен  $B_4C$  (Рисунок 2 д). Полученные покрытия исследовали методом Рамановской спектроскопии (Рисунок 3).

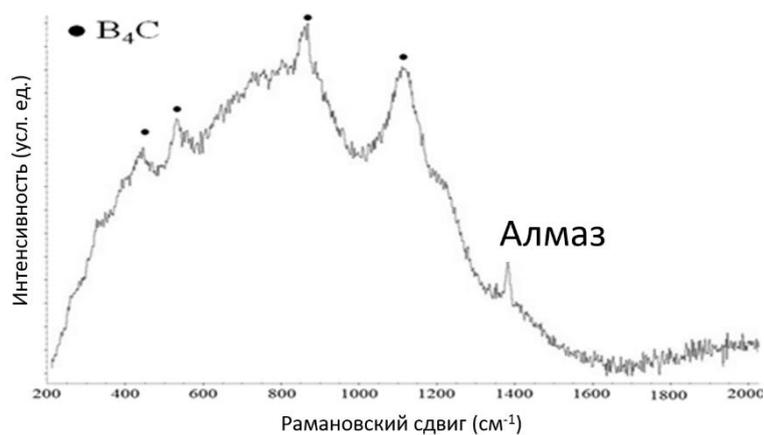


Рис. 3 – Рамановский спектр для алмазных частиц, покрытых при 1100 °С в течение 360 мин

Пик высокой интенсивности, расположенный приблизительно на  $1340 \text{ см}^{-1}$ , близок к алмазу [13]. Связи, расположенные на  $480, 530, 720, 830$  и  $1085 \text{ см}^{-1}$ , соответствуют вибрациям основных структурных элементов, икосаэдра и трехатомных линейных цепей в  $B_4C$  [1].

Относительная плотность и теплопроводность ( $\lambda$ ) композитов, полученных искровым плазменным спеканием, возрастают с увеличением температуры и продолжительности процесса нанесения покрытия (Рисунок 4 а, б). Для композита с алмазами покрытыми в течение 360 минут при  $1100^\circ\text{C}$ , были достигнуты относительная плотность 99% и теплопроводность  $680 \text{ Вт/м}^\circ\text{К}$ . Это можно объяснить двумя факторами: образованием более шероховатых покрытий (что облегчает сцепление между  $B_4C$  и матрицей) и накоплением остаточного непрореагировавшего бора на иглах  $B_4C$ . Растворение до 10 ат.% В в Си резко повышает смачиваемость  $B_4C$  медью и адгезию на поверхности раздела. [15]

Уменьшение (или устранение) зазоров между  $B_4C$  и металлической матрицей приводит к повышению плотности, теплопроводности и механических свойств композита. [1] Прочность на трехточечный изгиб ИПС-композитов с алмазами без покрытия составляла  $\approx 150$  МПа, в то время как композиты с алмазами, покрытыми при  $1100^\circ C$  в течение 360 минут, продемонстрировали в 2 раза более высокую прочность - до 320 МПа (Рисунок 4 в).

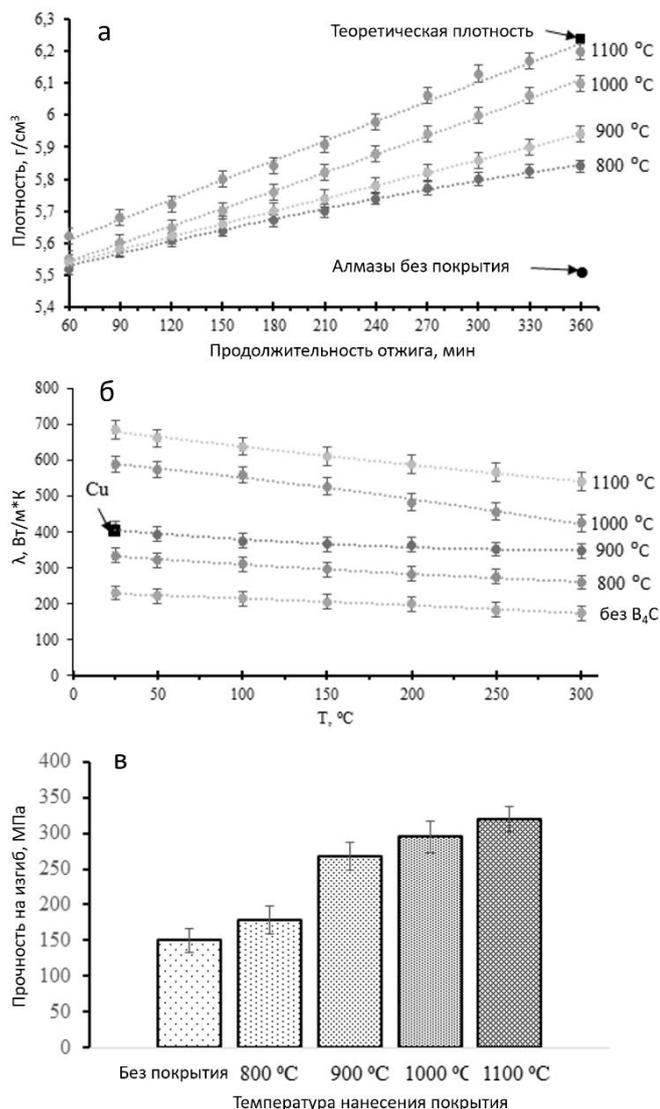


Рис. 4 – Относительная плотность (а), теплопроводность (б) и прочность на изгиб (а) композитных материалов, полученных искровым плазменным спеканием, в зависимости от условий покрытия  
Примечание: изображения (б, а) относятся к покрытиям, нанесенным в течение 360 мин

Полученные результаты открывают новый подход к изготовлению алмазно-металлических композитов с улучшенными свойствами: нанесение на алмазы покрытий  $B_4C$  с иглоподобной морфологией, что повышает адгезию между алмазом и металлической матрицей.

#### Заключение

1. Отжиг смеси алмаз+В+ $H_3BO_3$  при 800 и  $1100^\circ C$  приводит к формированию покрытия  $B_4C$  с резко отличающейся морфологией и шероховатостью поверхности ( $R_{max} = 2$  и  $20$  мкм, соответственно)

2. Плотность и теплопроводность композитов, полученных методом искрового плазменного спекания с использованием алмазов покрытых карбидом бора, увеличивается линейно с увеличением температуры (800 -  $1100^\circ C$ ) и продолжительность (60 – 360 мин) процесса нанесения покрытия.

3. Композит, полученный с использованием алмазов с иглоподобным покрытием  $B_4C$ , показал лучшую относительную плотность (до 99%), теплопроводность (до  $680$  Вт/м<sup>2</sup>\*К) и прочность на изгиб (до 320 МПа).

#### Финансирование

Работа проводилась в рамках программы «УМНИК» (номер гранта 8305ГУ2/2015).

#### Конфликт интересов

Не указан.

#### Funding

The work was carried out as part of the “UMNIK” program (grant number 8305GU2/2015).

#### Conflict of Interest

None declared.

## Список литературы / References

1. Sun Y. Enhanced tensile strength and thermal conductivity in copper diamond composites with B4C coating. / Y. Sun, L. He, C. Zhang, et al.// *Scientific Reports*. – Vol. 7(1). – 2017.
2. Abyzov A.M. Mechanical properties of a diamond–copper composite with high thermal conductivity. / A. M. Abyzov, F. M. Shakhov, A. I. Averkin, et al.// *Materials & Design*. – Vol. 87. – 2015. – P. 527–539.
3. Weidenmann K.A. Mechanical behaviour of diamond reinforced metals. / K. A. Weidenmann, R. Tavangar, L. Weber.// *Materials Science and Engineering: A*. – Vol. 523. – 2009. – P. 226–234. doi:10.1016/j.msea.2009.05.069.
4. Shen X. Y. Effect of molybdenum as interfacial element on the thermal conductivity of diamond/Cu composites. / X.-Y. Shen, X.-B. He, S.-B. Ren, et al. // *Journal of Alloys and Compounds*. – Vol. 529. – 2008. – P. 134–139.
5. Zhang Y. Enhanced thermal conductivity in copper matrix composites reinforced with titanium-coated diamond particles. / Y. Zhang, H. L. Zhang, J.H. Wu, et al. // *Scripta Materialia*. – Vol. 65. – 2011. – P. 1097–1100.
6. Schubert T. Interfacial characterization of Cu/diamond composites prepared by powder metallurgy for heat sink applications. / T. Schubert, L. Ciupinski, W. Zielinski, et al. // *Scripta Materialia*. – Vol. 58. – 2008. – P. 263–266.
7. Weber L. On the influence of active element content on the thermal conductivity and thermal expansion of Cu–X (X=Cr, B) diamond composites. / L. Weber, R. Tavangar.// *Scripta Materialia*. – Vol. 57. – 2007. – P. 988–991.
8. Schubert T. Interfacial design of Cu-based composites prepared by powder metallurgy for heat sink applications. / T. Schubert, T. Weissgaerber, B. // *Materials Science and Engineering: A*. – Vol. 475. – 2008. – P. 39–44.
9. Sun Q. Fabrication and characterization of diamond/copper composites for thermal management substrate applications. / Q. Sun, O. T. Inal. // *Materials Science and Engineering: B*. – Vol. 41. – 1996. – P. 261–266.
10. Abyzov A.M. Diamond–tungsten based coating–copper composites with high thermal conductivity produced by Pulse Plasma Sintering / A. M. Abyzov, M. J. Kruszewski, L. Ciupinski, et al. // *Materials & Design*. – Vol. 76. – 2015. – P. 97–109.
11. Ma S. Mo<sub>2</sub>C coating on diamond: Different effects on thermal conductivity of diamond/Al and diamond/Cu composites / S. Ma, N. Zhao, C. Shi, et al.// *Applied Surface Science* – Vol. 402. – 2017. – P. 372–383.
12. Zhao C. Enhanced mechanical properties in diamond/Cu composites with chromium carbide coating for structural applications. / C. Zhao, J. Wang. // *Materials Science and Engineering: A*. – Vol. 588. – 2013. – P. 221–227. doi:10.1016/j.msea.2013.09.034.
13. Sun Y. Enhancement of oxidation resistance via a self-healing boron carbide coating on diamond particles. / Y. Sun, Q. Meng, M. Qian, et al. // *Sci. Rep.* – Vol. 6. – 2016. doi:10.1038/srep20198.
14. Bai H. Effect of a new pretreatment on the microstructure and thermal conductivity of Cu/diamond composites / H. Bai, N. Ma, J. Lang, et al. // *Journal of Alloys and Compounds*. – Vol. 580. – 2013. – P. 382–385.
15. Froumin N. Ceramic–metal interaction and wetting phenomena in the B4C/Cu system. / N. Froumin, N. Frage, M. Aizenshtein, et al. // *Journal of the European Ceramic Society*. – Vol. 23(15). – 2003. – P. 2821–2828.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.90.12.008>

## ПРИМЕНЕНИЕ ГЛОБАЛЬНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ В МЕДИЦИНЕ

Научная статья

Гаджиева Т.А. \*

Азербайджанский Государственный Университет Нефти и Промышленности, Баку, Азербайджан

\* Корреспондирующий автор (Taranahaciyeva[at]yandex.ru)

### Аннотация

Информация, в реальном мире, не всегда является точной, полной и достоверной, что фактически затрудняет принятие конкретного решения. Особенно это является одной из больших проблем в медицинской сфере, так как от своевременного выявления и постановки правильного диагноза, зависит спасение человеческой жизни. Зачастую, бессимптомное или неоднозначно выраженное протекание многих онкологических заболеваний приводит к постановке ошибочного диагноза, а впоследствии и к неверному лечению. Во избежание таких случаев и для сведения к минимуму врачебных ошибок, медицина остро нуждается в создании и внедрении новых автоматизированных систем принятия решений, отвечающих современным требованиям при колоссальном объеме информации. В статье рассмотрены основные цели систем поддержки принятия медицинских решений, на примере рака поджелудочной железы.

**Ключевые слова:** Онкологические заболевания, Рак поджелудочной железы, Экспертная система, Система поддержки принятия решений.

## APPLICATION OF GLOBAL INFORMATION SYSTEMS IN MEDICINE

Research article

Gadzhieva T.A. \*

Gadzhieva Tarana Adylevna. Postgraduate student, Azerbaijan State University of Oil and Industry, Baku, Azerbaijan

\* Corresponding author (Taranahaciyeva[at]yandex.ru)

### Abstract

Information is not always accurate, complete and reliable in the real world; in fact, this makes it difficult to make a specific decision. This is one of the biggest problems in the medical field, since saving of a human life depends on the timely identification and diagnosis. Often, an asymptomatic or ambiguous course of numerous oncological diseases leads to an erroneous diagnosis, and subsequently to an incorrect treatment. In order to avoid such cases and to minimize medical errors, medicine urgently needs to create and implement new automated decision-making systems that meet modern requirements with an enormous amount of information. The article discusses the main goals of medical decision support systems, using pancreatic cancer as an example.

**Keywords.** Oncological diseases, Pancreatic cancer, Expert system, Decision support system.

### Введение

С самого своего зарождения человечество стремится, путём создания орудий и инструментов, расширить свои способности познавать и управлять окружающим миром. Сегодня мы стоим на пороге новых технических разработок, которые приумножают возможности человека. Для их осуществления с помощью компьютерных и программных методов разрабатываются новые технологии. Медицина является областью, в которой такая помощь крайне необходима. Повышенное требование высокого качества медицинского обслуживания и быстрый рост технического прогресса, заставляют врачей идти в ногу с новейшими разработками в своей области. Но ограниченность человеческой памяти в большинстве случаев, не позволяют запомнить дополнительно полученный, колоссальный объём информации. В экстренных случаях большинство медицинских заключений основываются на быстрых решениях, опирающихся только на опыт врача, а отсутствие времени не даёт возможности использовать постороннюю помощь [1]. Эту возможность дают новые компьютерные технологии: для организации, хранения и извлечения надлежащей медицинской информации, необходимой практикующему врачу в каждом конкретном случае, а также предложить соответствующие диагнозы и методы лечения. Правильный диагноз рака в ранней стадии, является сложной задачей, из-за комплекса взаимозависимых различных факторов. В условиях неопределённости и недостаточности информации на помощь врачам могут прийти глобальные информационные системы, основанные на применении технологий искусственного интеллекта и нечёткой логики, в создании которых необходимы совместные усилия медицинских экспертов и программистов.

### Принципы решения проблемы

Неотъемлемой частью нашей современности является колоссальный поток информации, которую очень сложно просеять и выбрать из неё только нужную, а ещё сложнее, если она нечёткая и трудно определяемая. Одной из таких предметных областей, насыщенных неполными сведениями является медицина, так как ей приходится иметь дело с субъективной информацией.

Пациент, посетивший врача, охарактеризовывает своё самочувствие. Из предоставленных неполных, субъективных информации врач должен выбрать те, которые могут являться симптомами предполагаемой болезни и назначить ряд анализов, а после получения ясной клинической картины поставить соответствующий диагноз и назначить лечение. Большинство медицинских заключений опираются на опыт врача и результаты, проведённых анализов [1]. Но как показывает практика, иногда этого бывает не достаточно, в особенности для малоопытных

специалистов, которым ограниченность времени, не возможность прибегнуть к помощи экспертов, поиск нужной литературы и множество других причин, мешают поставить верный диагноз. Ошибки врачей – непростительны!

Примером может послужить рак поджелудочной железы, одна из самых коварных болезней, нередко приводящих к летальному исходу. Удлиненная дольчатая железа, иначе называемая «пальцем бога», располагается в брюшной полости между позвоночником и верхним отделом задней стенки желудка [2]. Орган состоит из головки, тела и хвоста. Двенадцатиперстная кишка, в виде подковы прилегает к головке железы. Тело соседствует с позвоночником, селезёночными сосудами, брюшной аортой, нижней полой и левой почечной веной, а также и чревным сплетением. Между головкой и телом проходит воротная вена. Хвост имеет конусовидную форму и доходит до селезёнки. Такое близкое расположение железы, при раке делает её особенно опасной, так как опухоль сдавливает, закупоривает и может легко перейти в близлежащие органы. [3]. Основными функциями поджелудочной железы являются выделение панкреатического сока, продукции пищеварительных ферментов и выработка инсулина, гормона, регулирующего энергетический обмен глюкозы в тканях, а также принимает важное участие в регуляции жирового, белкового и углеводного обмена [1].

В группу риска рака поджелудочной железы, можно отнести больных: диабетом, желчнокаменной болезнью, острым и хроническим панкреатитом, воспалением ткани железы, циррозом печени. А также опухоль может наблюдаться при: воздействии радиации, лишнем весе, курении и злоупотреблении алкоголем [4].

На ранних стадиях, это распространённое онкологическое заболевание, имеющее высокий показатель смертности, почти не определяется, так как ведёт себя бессимптомно, без ярко выраженных недомоганий. Болевые ощущения возникают на следующих стадиях, при прорастании и прижимании нервных окончаний. Боль бывает опоясывающей, под правым ребром, в верхней части живота, слева, усиливается после приёма пищи, отдаёт в спину и в ноги. [5]. Именно в этот период может сложиться ложная клиническая картина, так как зачастую эти симптомы принимают за проявление панкреатита, воспалительных процессов или других болезней и подолгу пациенты неверно лечатся, а тем временем рак прогрессирует [6]. В более поздних стадиях: перекрывается панкреатический и желчный проток; возникает желтуха; печень и желчный пузырь увеличиваются в размерах; кал теряет цвет, моча – тёмная; возникает непроходимость; чувство распирания; отрыжки; слизистые оболочки и склеры глаз становятся желтушными; снижается свёртываемость крови; нарушается функционирование почек и сердечно-сосудистой системы, сопровождающейся отёком и тромбозом глубоких вен ног, инфарктом селезёнки и лёгких; расстраивается обмен веществ; кожа зудит; наблюдается общая слабость; потеря аппетита и массы тела; головные боли; раздражительность и частые депрессии [7]. Метастаз съедает организм. На такой стадии ничего практически сделать невозможно, увы, в таких случаях медицина – бессильна.

Для диагностики и лечения, на вооружении современной медицины широкий арсенал технических и лабораторных средств, методов, научной литературы и так далее. В большинстве случаев врачи вынуждены принимать экстренные решения, основываясь только на опыте, а ограниченность во времени не позволяет прибегнуть к расширенным исследованиям. Но возможности человеческого мозга не в состоянии удержать и обработать столь огромное количество информации [8]. Поэтому для помощи врачам при принятии полноценных решений, есть необходимость в создании автоматизированных, самообучающихся систем, основанных на знаниях экспертов, данных о пациентах, лабораторных исследованиях, результатах графических анализов, методах диагностики, лечения, реабилитации, обработке и установках связи между различными данными, событиями, фактами, явлениями и так далее. [9]. Учитывая выше изложенное, можно утверждать, что медицина является предметной областью, в которой приоритетной задачей стала применение информационных систем, для своевременного выявления и точного диагностирования болезней в условиях неопределённости, так как в ситуациях требующих сложного аналитического рассмотрения, роль систем поддержки принятия решений незаменима. [10]. В зависимости от специфики, объёмов исходных данных, наличия методик диагностики, используются множество различных подходов реализации построения таких систем с: применением нейронных сетей, технологий искусственного интеллекта, нечёткой логики, использованием эвристических и формальных алгоритмов, экспертных систем, основанных на базах знаний. Для решения поставленной задачи необходимы принятие участия и совместные усилия компетентных медицинских экспертов, программистов, а также специалистов в создании глобальных систем по всему миру!

#### **Заключение**

Для улучшения качества медицинской помощи, повышения эффективности и сокращения расходов на здравоохранение есть необходимость в разработке глобальных систем принятия решений, которые не следует рассматривать, как технологии замены врача. Они должны быть реализованы, как инструмент для оказания помощи медицинскому персоналу в постановке достоверного диагноза, методов лечения и реабилитации онкологических заболеваний и особо в случаях рака поджелудочной железы на ранних стадиях.

#### **Конфликт интересов**

Не указан.

#### **Conflict of Interest**

None declared.

#### **Список литературы / References**

1. Черенков В.Г. Клиническая онкология / Черенков В.Г., Москва, 2010.
2. Губергриц Н.Б. Панкреатология: от прошлого к будущему / Губергриц Н.Б., Москва, 2009.
3. Блохин Н.Н. Клиническая онкология / Блохин Н.Н., Петерсон Б.Б. //, Москва, 1979.
4. Горшенина Е.И. Поджелудочная железа / Горшенина Е.И., Москва, 2018.
5. Лепорский Н.И. Болезни поджелудочной железы / Лепорский Н.И., Москва, 1951.
6. Черноусов Ф.А. Хирургические болезни / Черноусов Ф.А., ГЭОТАР-МЕДИА, 2010.
7. Введенский Б.А. Большая Советская Энциклопедия / Введенский Б.А., 1955.

8. Каешко А.И. Принципы построения клинической системы поддержки принятия решений, на основе технологии OSTIS / Каешко А.И., Моргунов Е.А., Минск, 2016.

9. Симанков В.С. //Системный подход к разработке медицинских систем поддержки принятия решений / Симанков В.С., Кубань, 2010.

10. Устинова Е.Ю. Инновационные технологии в управлении качеством медицинской помощи больным со злокачественными новообразованиями / Устинова Е.Ю. //, Воронеж, Россия, 2010.

**Список литературы на английском языке / References in English**

1. Cherenkov V.G. Klinicheskaya onkologiya [Clinical oncology] / Cherenkov V.G. Moscow, 2010. [in Russian]

2. Hubergrits N.B. Pankreatologiya: ot proshlogo k budushchemu [Pancreatology: from past to future] / Hubergrits N.B. Moscow, 2009. [in Russian]

3. Blokhin N.N. Klinicheskaya onkologiya [Clinical oncology] / Blokhin N.N., Peterson B.B. Moscow, 1979. [in Russian]

4. Gorshenina E.I. Podzheludochnaya zheleza [Pancreas] / Gorshenina E.I. Moscow, 2018. [in Russian]

5. Leporsky N.I. Bolezni podzheludochnoy zhelezy [Diseases of pancreas] / Leporsky N.I. Moscow, 1951. [in Russian]

6. Chernousov F.A. Khirurgicheskiye bolezni [Surgical diseases] / Chernousov F.A. GEOTAR-MEDIA, 2010. [in Russian]

7. Vvedensky B.A. Bol'shaya Sovetskaya Entsiklopediya [Great Soviet Encyclopedia] / Vvedensky B.A. 1955. [in Russian]

8. Kayeshko A.I. Printsipy postroyeniya klinicheskoy sistemy podderzhki prinyatiya resheniy, na osnove tekhnologii OSTIS [Principles of building clinical decision support system based on OSTIS technology] / Kayeshko A.I., Morgunov E.A. Minsk, 2016. [in Russian]

9. Simankov V.S. Sistemnyy podkhod k razrabotke meditsinskikh sistem podderzhki prinyatiya resheniy [Systematic approach to development of medical decision support systems] / Simankov V.S. Kuban, 2010. [in Russian]

10. Ustinova E.Yu. Innovatsionnyye tekhnologii v upravlenii kachestvom meditsinskoy pomoshchi bol'nym so zlokachestvennymi novoobrazovaniyami [Innovative technologies in managing quality of medical care for patients with malignant neoplasms] / Ustinova E.Yu. Voronezh, Russia, 2010. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.90.12.009>

## ВЛИЯНИЕ ТИПА ОТВЕРДИТЕЛЯ И МОДИФИКАТОРОВ НА КИСЛОТОПРОНИЦАЕМОСТЬ ЭПОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ

Научная статья

Головин В.А.<sup>1,\*</sup>, Ильин А.Б.<sup>2</sup>, Алиев А.Д.<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> ФГБУН Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук (ИФХЭ РАН), Москва, Россия

\* Корреспондирующий автор (golovin[at]rocor.ru)

### Аннотация

Исследована кинетика сорбции и зарегистрированы диффузионные профили раствора серной кислоты в антикоррозионные материалы на основе эпоксидной смолы отверждаемые аминами или ангидридами. Оценена перспектива использования ацидофобного материала на основе ангидридного отверждения для формирования внешнего слоя композиционного покрытия.

**Ключевые слова:** многослойное антикоррозионное покрытие, аминное отверждение, ангидридное отверждение, проницаемость, диффузионный профиль.

## INFLUENCE OF HARDENER AND MODIFIER TYPE ON ACID PERMEABILITY OF EPOXY COATINGS

Research article

Golovin V.A.<sup>1,\*</sup>, Ilyin A.B.<sup>2</sup>, Aliev A.D.<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> FSBEI of HE, Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, the Russian Academy of Sciences (IPCE, RAS), Moscow, Russia

\* Corresponding author (golovin[at]rocor.ru)

### Abstract

The authors studied and acidophilic sorption kinetics and diffusion profiles of a sulfuric acid solution in anticorrosive materials based on epoxy resin cured by amines or anhydrides. They also evaluated the prospect of using an acidophobic material based on anhydride curing to form the outer layer of the composite coating.

**Keywords:** multilayer anti-corrosion coating, amine cure, anhydride cure, permeability, diffusion profile.

### Введение

Применительно к противокоррозионным покрытиям рассматривают [1, С. 39] две модели диффузионного переноса кислот в полимерах, учитывающих возможность связывания диффузанта.

Первая модель основывается на том, что проникновение кислоты из внешнего водного раствора всегда идет при опережающем проникновении воды, то есть в предварительно насыщенный водой полимер [1, С. 37]. В этом случае перенос молекул кислоты осуществляется между водными кластерами в полимере [2, С. 887], [3, С. 41]. При этом рассматривается как вариант существования в полимере ассоциатов с составом равным, составу внешнего раствора, так и с составом сольватов не зависящим от концентрации кислоты вне полимерной матрицы. Эта модель обычно используется для случая гидрофобных полимеров.

Вторая модель подразумевает возможность протекания химического связывания кислоты с реакционноспособными группами полимерной матрицы [4, С. 26], [5, С. 33]. При этом сорбированная молекула выбывает из процесса диффузии, а скорость диффузионного переноса определяется областью между границей образца и резкой диффузионной границей [6, С. 62]. Дальнейшая диффузия в исходный полимер протекает только после полной выработки реакционноспособных групп полимера, и скорость проникновения кислоты подчиняется закону «глубина проникновения кислоты ~ корень из времени». Эта модель используется для описания переноса в умеренно гидрофильных реактопластах с центрами связывания.

Целью работы являлось, оценка возможности регулирования гидрофильности полимерной матрицы на основе эпоксидных реактопластов и диффузионного переноса при введении различных модификаторов и использовании отвердителей различной природы.

### Объекты и методы исследования

Образцы полимерных материалов (Табл. 1) готовились на основе эпоксидно-диановой смолы ЭД-20 (ГОСТ 10587-84 изм. 1);

В качестве отвердителей использовались аминный отвердитель триэтилентетрамин ТЭТА (CAS 112-24-3), полиамидные отвердители Л-18 и Л-19 [7, С. 100], ПО-300 [8, С. 90] (ТУ 2494-609-11131395-2005 изм. 1-3); ангидридный отвердитель РАО-19 (ТУ-2123-10-11490792-19).

В качестве модификаторов использовались бутадиенакрилонитрильный каучук с концевыми карбоксильными группами СКН-26-1А (ТУ 38.303-01-41-92); полиамидные модификаторы Л-18, Л-19, ПО-300 (ТУ 2494-609-11131395-2005 изм. 1-3); перфторспирт-теломер [9, С. 23]  $n_3 \text{H}(\text{C}_2\text{F}_4)_3\text{CH}_2\text{OH}$  (ТУ 2421-151-05807690-2005 изм. 1-2); перфторированные кислоты [10, С. 25], а именно, кислота перфторэнантовая ПФЭК  $\text{C}_6\text{F}_{13}\text{COOH}$  (СТО 05807690-008-2013); кислота перфторпеларгоновая ПФПК  $\text{C}_8\text{F}_{17}\text{COOH}$  (СТО 05807690-009-2013); Твердая ПФПК перед введение растворялась в смеси толуол/ацетон 1:1.

Режим отверждения всех приготовленных образцов ступенчатый: +20 °С 24 часа, +80 °С 6 часов, +120 °С 2 часа.

Исследования проводили в 40% растворе серной кислоты в дистиллированной воде и в дистиллированной воде.

Выбор диффузанта основывается на том, что для умеренно гидрофильных полимерных составов оптимальным диффузантом, или индикатором гидрофильности, являются нелетучие минеральные кислоты [11, С. 165], [12, С. 18], например, серная со средней неокислительной концентрацией, так как летучие кислоты, например, соляная, легко диффундируют и в полностью гидрофобные полимеры, такие как полиолефины ПЭ, ПП и фторопласты Ф4 [13, С. 152].

Миграционная способность и растворимость диффузантов в эпоксидной матрице оценивалась по концентрационным профилям распределения, которые регистрировались с помощью метода локального рентгеноспектрального анализа ЛРСА [14, С. 212]. Метод позволяет провести определение концентрационного распределения характеристического элемента серы S присутствующего в молекуле  $H_2SO_4$ . Исследования проводили на электронном микроскопе JSM-U3 с рентгеновским спектрометром с энергетической дисперсией и приставкой для цифрового сканирования GETAC; компьютерная программа GETAC выполняет ZAF коррекцию для безэталонового расчёта содержания элементов; детектор LiSi полупроводниковый со сверхтонким полимерным окошком с разрешением 140 эВ. Гравиметрические исследования кинетики привеса выполнялись на аналитических весах

### Результаты исследования

Кинетика привеса полимерных образцов в воде представлена в Таблице № 1.

Таблица № 1 – Привесы в воде  $P_w$  образцов эпоксидных материалов при 50 °С в течение  $t_a = 678$  часов

№	Состав эпоксидного материала (м.ч.)	$P_w$ , %
1.	ЭД-20 (100), СКН-26-1А (5), ТЭТА (10)	2,0
2.	ЭД-20 (100), Л-18 (5), ТЭТА (10)	2,2
3.	ЭД-20 (100), Л-19 (5), ТЭТА (10)	2,0
4.	ЭД-20 (100), ПО-300 (5), ТЭТА (10)	2,0
5.	ЭД-20 (100), СКН-26-1А (5), РАО-19 (100)	8,8
6.	ЭД-20 (100), СКН-26-1А (5), н3 (8), ТЭТА (10)	2,5
7.	ЭД-20 (100), СКН-26-1А (5), ПФЭК (8), ТЭТА (10)	2,0
8.	ЭД-20 (100), СКН-26-1А (5), ПФПК (8), ТЭТА (10)	1,3
9.	ЭД-20 (100), СКН-26-1А (5), н3 (2), ПФЭК (2), ПФПК (2), ТЭТА (10)	3,7
10.	ЭД-20 (100), Л-18 (110)	-3,2
11.	ЭД-20 (100), Л-19 (80)	-0,2
12.	ЭД-20 (100), ПО-300 (60)	6,3

Примечание: для составов №№ 10-12 количество отвердителя соответствует паспортным данным

Анализ приведённых данных показывают, что для составов №№ 2 - 4, в которых полиамиды используются в малых количествах, в качестве модификаторов заменяющих пластифицирующий каучук, привесы в воде  $P_w$  близки к значениям привеса модельного состава № 1 и составляют 2,0 ... 2,2%. Близкие значения сорбции воды демонстрируют и составы, модифицированные перфторированными спиртами и кислотами №№ 6-9, для них  $P_w = 1,3 \dots 3,7\%$ .

При использовании полиамидов в качестве самостоятельных отвердителей в значительных стехиометрических количествах (№№ 10-12) наблюдается проявление их десорбции из полимера в количествах -0,2 ... -3,2% для отвердителей типа Л и значительное увеличение привеса до +6,3% для типа ПО.

Ещё более увеличивает сорбцию воды  $P_w$ , а именно в 4 раза по сравнению с модельным составом, высокополярный отвердитель на основе ангидрида РАО-19 (№ 5).

Привесы в растворе 40%  $H_2SO_4$ , а также скорости проникновения диффузионных фронтов по полимерной матрице представлены в Таблице № 2. Скорость проникновения кислоты рассчитывалась по формуле  $\lambda_a = X_a / t_a^{0.5}$ , где  $X_a$  – глубина проникновения, а  $t_a$  – время проникновения кислоты. Привес  $P_a^{сф}$  образцов толщиной L в момент смыкания ступенчатых фронтов кислоты рассчитывался по значениям привеса  $P_a$  и глубины проникновения кислоты  $X_a$  при экспозиции полимера в растворе кислоты длительностью  $t_a = 678$  часов по формуле  $P_a^{сф} = P_a / (2 * X_a) * L$  [1].

Таблица № 2 – Привесы  $P_a$  и  $P_a^{сф}$  и скорости проникновения  $\lambda_a$  для 40%  $H_2SO_4$  в модифицированные полиамидами эпоксидные материалы при 50 °С в течение  $t_a = 678$  часов

№	Состав эпоксидного материала (м.ч.)	$P_a$ , %	$\lambda_a$ , мкм/час <sup>0.5</sup>	$P_a^{сф}$ , %
1.	ЭД-20 (100), СКН-26-1А (5), ТЭТА (10)	3,3	3,8	44,3
2.				
3.	ЭД-20 (100), Л-18 (5), ТЭТА (10)	5,9	7,0	38,5
4.	ЭД-20 (100), Л-19 (5), ТЭТА (10)	5,5	5,8	42,3
5.	ЭД-20 (100), ПО-300 (5), ТЭТА (10)	11,6	5,8	46,9

Как видно, введение полиамидного модификатора, без изменения количества отвердителя приводит к росту сорбции кислоты  $P_a$  в ~ 2 ... 3 раза и росту скорости проникновения кислоты  $\lambda_a$  в ~ 1,5 ... 2 раза. Это явление может быть объяснено тем, что полиамиды содержат аминогруппы и помимо пластифицирующего действия выступают в качестве дополнительных центров связывания.

Поскольку основным отвердителем в данном случае выступает ТЭТА количество аминогрупп вносимых полиамидами избыточно и увеличивает величину сорбционной ёмкости. В этой связи при формировании реальных составов потребуется корректировка количества отвердителя для учёта аминогрупп содержащихся в Л-18, Л-19 и ПО-300.

Проникновение кислоты в полимер при этом происходит с формированием резкого обрывного ступенчатого профиля (Рис. 1, Рис. 2).

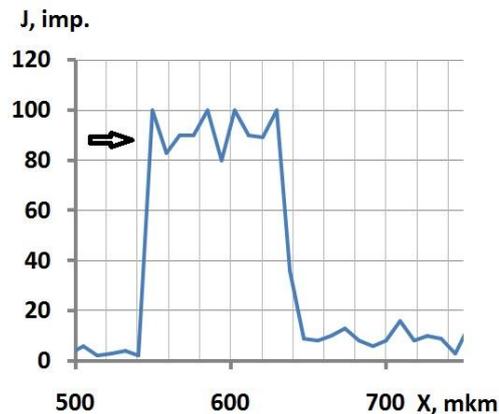


Рис. 1 – Профиль распределения серы (J, imp.) по координате диффузии (X, мкм) при проникновении 40 %  $H_2SO_4$  при 50 °С в течение 678 часов в модельный эпоксидный состав (№ 1) модифицированный СКН-26-1А

*Примечание: стрелкой показано направление диффузии кислоты*

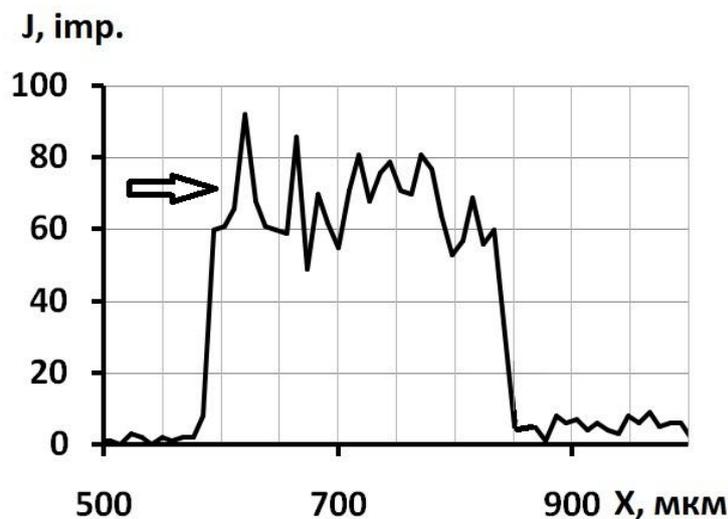


Рис. 2 – Профиль распределения серы (J, imp.) по координате диффузии (X, мкм) при проникновении 40 %  $H_2SO_4$  при 50 °С в течение 678 часов в эпоксидный состав модифицированный Л-18 (№ 2)

*Примечание: стрелкой показано направление диффузии кислоты*

Значения привеса немодифицированного состава № 1 для времени смыкания диффузионных фронтов  $P_a^{cf}$  находится в интервале значений для модифицированных матриц. Для длительного применения в кислых средах, оцениваемого по привесу при смыкании ступенчатых фронтов кислоты  $P_a^{cf}$  модификация Л-18 и Л-19 предпочтительнее, чем ПО-300. При использовании Л-18, Л-19 и ПО-300 в качестве модифицирующих пластификаторов за период наблюдения движения фронтов кислоты по полимерной матрице не достигается смыкание фронтов и приближение привеса к равновесным значениям (рис. 3).

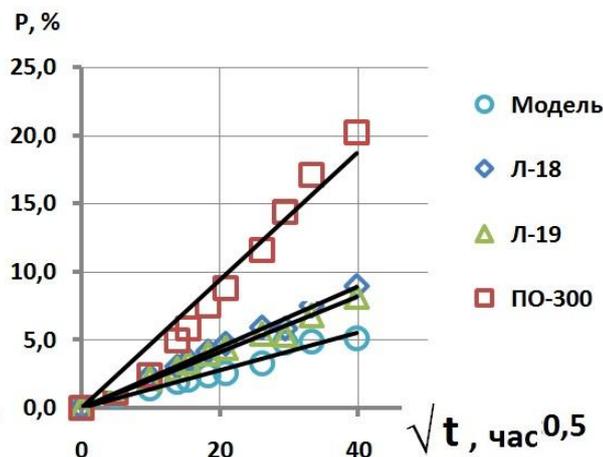


Рис. 3 – Кинетика ( $\sqrt{t}$ , час<sup>0,5</sup>) привеса ( $P$ , %) при проникновении 40 %  $H_2SO_4$  при 50 °С в модельный эпоксиный состав (№ 1) модифицированный СКН-26-1А и составы модифицированные Л-18 (№ 2), Л-19 (№ 3) и ПО-300 (№ 4)  
Примечание: Составы отверждены ТЭТА

Помимо полиамидных модификаторов эпоксиной матрицы были исследованы перфторированные соединения, содержащие спиртовые и кислотные группы известные каталитической и отверждающей активностью по отношению к эпоксидам.

При использовании перфторированных соединений в качестве дополнительных к каучуку пластификаторов наблюдается (Табл. 3) рост сорбции кислоты  $P_a$  и рост скорости её проникновения в полимер  $\lambda_a$  по сравнению с модельным составом. При этом для составов модифицированных спиртом n3 и кислотой ПФЭК наблюдается смыкание фронтов уже за период наблюдения, то есть при  $t_a = 678$  часов, в то время как для ПФПК значения  $\lambda_a$  сопоставимы с модельным составом и значения  $P_a^{сф}$  для модельного состава № 1 лежат в интервале значения для модифицированных составов №№ 7-8.

Таблица № 3 – Привесы  $P_a$  и  $P_a^{сф}$  и скорости проникновения  $\lambda_a$  для 40%  $H_2SO_4$  в модифицированные перфторированными соединениями эпоксиные материалы при 50 °С в течение  $t_a = 678$  часов

№	Состав эпоксиного материала (м.ч.)	$P_a$ , %	$\lambda_a$ , мкм/час <sup>0,5</sup>	$P_a^{сф}$ , %
1.	ЭД-20 (100), СКН-26-1А (5), ТЭТА (10)	3,3	3,8	44,3
6.	ЭД-20 (100), СКН-26-1А (5), n3 (8), ТЭТА (10)	5,0	ПП, >57	5,0
7.	ЭД-20 (100), СКН-26-1А (5), ПФЭК (8), ТЭТА (10)	3,8	ПП, >37	3,8
8.	ЭД-20 (100), СКН-26-1А (5), ПФПК (8), ТЭТА (10)	7,9	4,0	36,1
9.	ЭД-20 (100), СКН-26-1А (5), n3 (2), ПФЭК (2), ПФПК (2), ТЭТА (10)	5,7	5,9	46,2

Для составов модифицированных перфторированными соединениями n3 (№ 6), ПФЭК (№ 7), ПФПК (№ 8) и их смесью (№ 9) также характерны ступенчатые профили проникновения серной кислоты (рис. 4) и со смыканием фронтов (рис. 5).

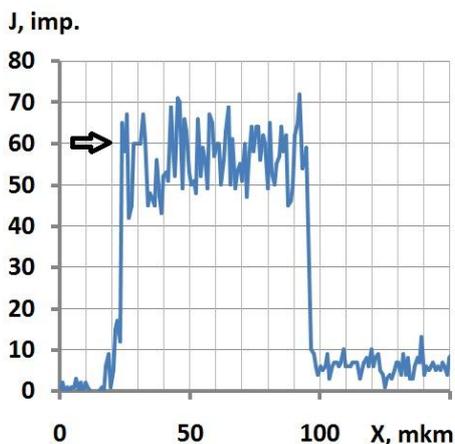


Рис. 4 – Профиль распределения серы ( $J$ , imp.) по координате диффузии ( $X$ , mkm) при проникновении 40 %  $H_2SO_4$  при 50 °С в течение 678 часов в эпоксиный состав модифицированный ПФПК (№ 8)  
Примечание: стрелкой показано направление диффузии кислоты

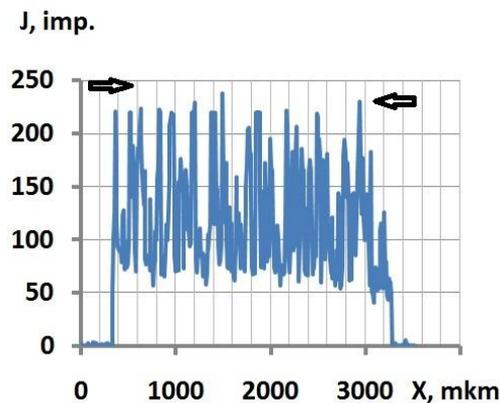


Рис. 5 – Профиль распределения серы (J, imp.) (ПП - полное проникновение) по координате диффузии (X, mkm) при проникновении 40 % H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> при 50 °С в течение 678 часов в эпоксидный состав модифицированный спиртом-теломером n3 (№ 6)

Примечание: стрелками с двух сторон показаны направления диффузии кислоты

Наиболее оптимально модифицирование эпоксидного состава перфтор- пеларгоновой кислотой ПФПК (№ 8) приводящее к значениям P<sub>w</sub>, λ<sub>a</sub> и P<sub>a</sub><sup>сф</sup> меньшим или сопоставимым с модельным составом.

Для составов модифицированных n3 (№ 6) или ПФЭК (№ 7) несмотря на привлекательное снижение значений P<sub>a</sub><sup>сф</sup> наблюдается резкий, более чем на порядок, рост скорости проникновения кислоты λ<sub>a</sub>.

Комплексная композиция, содержащая смесь n3, ПФЭК и ПФПК (№ 9), также по величине сорбции и скорости проникновения уступает составу с индивидуальной ПФПК (№ 8).

Для оценки определяющего фактора модели с химическим связыванием - роли центров связывания, проведено исследования влияния содержания аминогрупп в полимерной матрице.

Составы (Табл. 4) отверждённые стехиометрическими количествами полиамидов Л-18 (№ 10), Л-19 (№ 11) и ПО-300 (№ 12) характеризуются значительной скоростью движения диффузионной ступеньки λ<sub>a</sub> составляющей более 12 ... 58 мкм/час<sup>0,5</sup>.

Таблица № 4 – Привесы P<sub>a</sub> и P<sub>a</sub><sup>сф</sup> и скорости проникновения λ<sub>a</sub> для 40% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> в отверждённые полиамидами эпоксидные материалы при 50 °С в течение t<sub>a</sub> = 678 часов

№	Состав эпоксидного материала (м.ч.)	P <sub>a</sub> , %	λ <sub>a</sub> , мкм/час <sup>0,5</sup>	P <sub>a</sub> <sup>сф</sup> , %
1.	ЭД-20 (100), СКН-26-1А (5), ТЭТА (10)	3,3	3,8	44,3
10.	ЭД-20 (100), Л-18 (110)	31,5	ПП, >58	31,5
11.	ЭД-20 (100), Л-19 (80)	29,0	ПП, >12	29,0
12.	ЭД-20 (100), ПО-300 (60)	47,0	ПП, >27	47,0

Для этих составов после смыкания фронтов кислоты (рис. 6) привес образцов продолжается и принимает равновесные значения P<sub>a</sub><sup>∞</sup> 35 ... 55 % заметно превышающие P<sub>a</sub><sup>сф</sup> 29 ... 47 %.

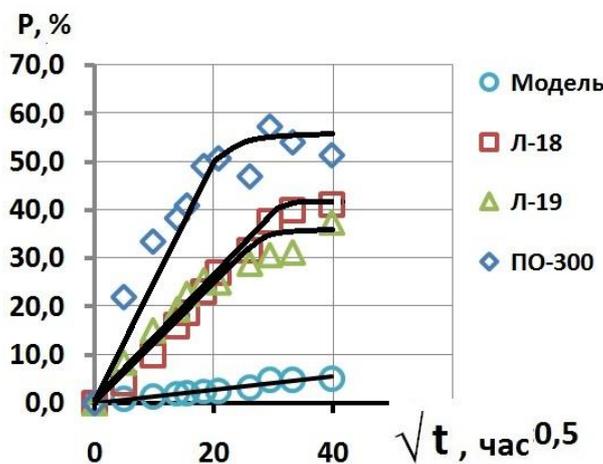


Рис. 6 – Кинетика (√t, час<sup>0,5</sup>) привеса (P, %) при проникновении 40 % H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> при 50 °С в модельный эпоксидный состав (№ 1) модифицированный СКН-26-1А и отверждённый ТЭТА и составы отверждённые Л-18 (№ 10), Л-19 (№ 11) и ПО-300 (№ 12)

Также следует принять во внимание тот факт, что сорбция воды  $P_w$  (Табл. 1) для этих составов колеблется от -3,2 до +6,3 %, что в совокупности с высокой проницаемостью по отношению к кислоте ограничивает использование полиамидов в качестве отвердителей кислотостойких покрытий даже в случае корректировки содержания отвердителя.

Значительное снижение сорбции кислоты покрытиями, а именно, снижения  $P_a$  и  $P_a^{cf}$  более чем на порядок (Табл. 5), проявляется при отверждении эпоксидных олигомеров ангидридным отвердителем.

Таблица № 5 – Привесы  $P_a$  и  $P_a^{cf}$  и скорости проникновения  $\lambda_a$  для 40%  $H_2SO_4$  в отверждённые ангидридным отвердителем эпоксидные материалы при 50 °С в течение  $t_a = 678$  часов

№	Состав эпоксидного материала (м.ч.)	$P_a$ , %	$\lambda_a$ , мкм/час <sup>0,5</sup>	$P_a^{cf}$ , %
1.	ЭД-20 (100), СКН-26-1А (5), ТЭТА (10)	3,3	3,8	44,3
5.	ЭД-20 (100), СКН-26-1А (5), РАО-19 (100)	0,2	3,6	0,9

Отвердитель РАО-19 (№ 5) содержит кислотные группы без перфторированной составляющей, причём в отличие от аминных отвердителей при проникновении кислоты в полимерную матрицу ангидридного отверждения не формируется ступенчатый профиль. Проникновение кислоты происходит с классическим филовским профилем [14] распределения диффузанта по координате диффузии (Рис. 7).

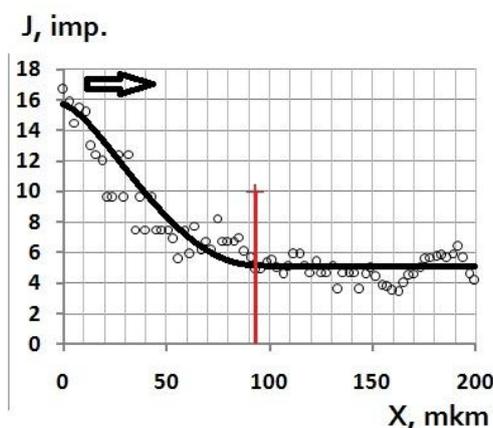


Рис. 7 – Профиль распределения серы ( $J$ , imp.) по координате диффузии ( $X$ , mkm) при проникновении 40 %  $H_2SO_4$  при 50 °С в течение 678 часов в эпоксидный состав отверждённый РАО-19 (№ 5)

Примечание: стрелкой показано направление диффузии кислоты. Красная линия – глубина проникновения кислоты

Полученные значения скорости проникновения 40%  $H_2SO_4$   $\lambda_a$  составляющая 3,6 мкм/час<sup>0,5</sup> при 50 °С позволяет сравнивать полимер ангидридного отверждения с гидрофобным фторопластом Ф-26 имеющем для 94%  $H_2SO_4$  при 100 °С значение  $\lambda_a = 120$  мкм/час<sup>0,5</sup> [13, С. 154].

Обращает на себя внимание тот факт, что введение в состав в качестве отвердителя ангидрида не приводит к выраженной гидрофобизации эпоксидной матрицы; высокополярный ангидрид повышает сорбцию воды  $P_w$  по сравнению с модельным аминным отверждением.

Однако ангидридный отвердитель принципиально снижает величину сорбции кислоты  $P_a$ ,  $P_a^{cf}$  при сохранении величины скорости её проникновения  $\lambda_a$ . Такое различие в свойствах amino-отверждённого полимера и ангидридо-отверждённого полимера позволяет охарактеризовать полимеры как ацидофильные и ацидофобные, что может быть использовано при создании многослойных композиционных покрытий [15, С. 679].

Таким образом, в заключении можно констатировать, что введение модификаторов и отвердителей различной химической природы позволяет регулировать гидрофильность и ацидофобность полимерной матрицы на основе эпоксидных реактопластов и тем самым оптимизировать диффузионный перенос кислотных растворов.

#### Конфликт интересов

Не указан.

#### Conflict of Interest

None declared.

#### Список литературы / References

1. Головин В.А. Многослойные защитные полимерные покрытия. Проницаемость в высокоагрессивных средах / Головин В.А. // Коррозия: материалы, защита. 2004, № 6, с. 39.
2. Штерензон А. Л. Диффузия и сорбция в системе полиэтилен - хлористый водород. Высокомолекулярные соединения / Штерензон А. Л., Рейтлингер С. А., Топина Л. П. 1969, Том 11(А), Номер 4, с. 887-895.
3. Croll S.G. Electrolyte transport in polymer barrier coatings: perspectives from other disciplines. Progress in Organic Coatings Volume 124 / Croll S.G., November 2018, Pages 41-48. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2018.07.027>
4. Головин В.А. Модель диффузии химически активных сред в полимерные покрытия / Головин В.А. // Лакокрасочные материалы и их применение. 1996. № 4. С. 26-28.
5. Magdalena Legan, Andrzej W. Trochimczuk. Bis-Imidazolium Type Ion-Exchange Resin with Poly (Hipe) Structure for

the Selective Separation of Anions from Aqueous Solutions. Separation Science and Technology 53(33) p. 33 September 2017. DOI: 10.1080/01496395.2017.1378678

6. Муров В.А. О применении индикаторного метода определения глубины диффузии минеральных кислот в полимерных пленках. Лакокрасочные материалы и их применение / Муров В.А., Шевченко А.А., Клинов И.Я. 1970, № 2, с. 62-64.

7. Григорьев Г. П. Полимерные материалы / Григорьев Г. П., Ляндзберг Г. Я., Сирота А. Г. М. Высшая школа 1966 г. 260 с.

8. Розенфельд И.Л. Защита металлов от коррозии лакокрасочными покрытиями / Розенфельд И.Л., Рубинштейн Ф.И., Жигалова К.А. — Москва: Химия, 1987. 222 с.

9. Квасников М.Ю. Пластификация эпоксидно-диановых покрытий полифторированными спиртами-теломерами / Квасников М.Ю., Киселёв М.Р., Климова И.Д., и др. // Химическая промышленность сегодня. 2005. № 12. С.23 – 27.

10. Квасников М.Ю. Влияние добавок перфторкислот на отверждение меламиноалкидных покрытий / Квасников М.Ю., Климова И.Д., Кантеров В.Я. и др. // Лакокрасочные материалы и их применение. 1995. № 9–10. С. 23 –25.

11. Головин В.А. // Исследование десорбции фосфоновых кислот, прекурсоров ингибиторов коррозии, из полимерных микрокапсул. / Головин В.А., Ильин А.Б., Алиев А.Д. и др.// The International Journal of Corrosion and Scale Inhibition 2018, 7, № 2, p. 165–174 DOI: 10.18334/np2570

12. Головин В.А. Массоперенос фосфорсодержащих ингибиторов коррозии в эпоксидных защитных покрытиях. / Головин В.А., Ильин А.Б., Алиев А.Д., Рабинков В.А. // Коррозия: Материалы, Защита, 2018. № 8, с. 18-24 DOI: 10.31044/1813-7016-2018-0-8-18-24

13. Заиков Г.Е. Диффузия электролитов в полимерах / Заиков Г.Е., Иорданский А.Л., Маркин В.С. – М.: Химия, 1984. С. 152, 154

14. Малкин А.Я. Диффузия и вязкость полимеров. Методы измерения / Малкин А.Я., Чалых А.Е. - М.: Химия, 1979. с.212-219.

15. Golovin V. A. Multilayer protective polymeric coatings: Providing for their continuity / Golovin V. A. // Protection of Metals 43(7): p. 679-688 · November 2007 DOI: 10.1134/S0033173207070119

#### Список литературы на английском языке / References in English

1. Golovin V.A. Mnogoslojnye zashchitnye polimernye pokrytiya. Pronicaemost' v vysokoagressivnyh sredah [Multilayer protective polymer coatings. Permeability in highly aggressive environments] / Golovin V.A. // Corrosion: materials, protection 2004, № 6, p. 39. [in Russian]

2. Shterenzon A. L. Diffuziya i sorbcija v sisteme polietilen - hloristyj vodorod [Diffusion and sorption in the system polyethylene - hydrogen chloride] / Shterenzon A. L., Rejtlinger S. A., Topina L. P. // High molecular weight compounds, 1969, Tom 11(A), N 4, p. 887-895. [in Russian]

3. Croll S.G. Electrolyte transport in polymer barrier coatings: perspectives from other disciplines / Croll S.G. // Progress in Organic Coatings Volume 124, November 2018, Pages 41-48. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2018.07.027>

4. Golovin V.A. Model diffuzii himicheski aktivnyh sred v polimernye pokrytiya [A model for the diffusion of chemically active media into polymer coatings] / Golovin V.A. // Paintwork materials and their application. 1996. № 4. P. 26-28. [in Russian]

5. Magdalena L. Trochimczuk. Bis-Imidazolium Type Ion-Exchange Resin with Poly (Hipe) Structure for the Selective Separation of Anions from Aqueous Solutions / Magdalena L., Andrzej W. // Separation Science and Technology 53(33) p. 33 September 2017. DOI: 10.1080/01496395.2017.1378678

6. Murov V.A. O primenenii indikatornogo metoda opredeleniya glubiny diffuzii mineral'nyh kislot v polimernyh plenках [On the use of the indicator method for determining the diffusion depth of mineral acids in polymer films] / Murov V.A., Shevchenko A.A., Klinov I.Ya. // Paint and varnish materials and their application 1970, № 2, p. 62-64. [in Russian]

7. Grigor'ev G. P. Polimernye materialy [Polymer materials] / Grigor'ev G. P., Lyandzberg G. YA., Sirota A. G. M. // High School 1966 g. 260 p. [in Russian]

8. Rozenfeld I.L. Zashchita metallov ot korrozii lakokrasochnymi pokrytiami [Protection of metals from corrosion by paintwork] / Rozenfeld I.L., Rubinshtejn F.I., Zhigalova K.A. // Moscow: Chemistry, 1987. –222 p. [in Russian]

9. Kvasnikov M.Yu. Plastifikaciya epoksidno-dianovyh pokrytij poliflorirovannymi spirtami-telomerami [Plastification of epoxy-dianic coatings with polyfluorinated telomeric alcohols] / Kvasnikov M.Yu., Kiselyov M.R., Klimova I.D., Cejtlin G.M. // Chemical Industry Today. 2005. No 12. P.23 – 27. [in Russian]

10. Kvasnikov M.Yu. Vliyanie dobavok perftorkislot na otverzhdenie melaminoalkidnyh pokrytij [The effect of perfluoric acid additives on the curing of melamine-alkyd coatings] / Kvasnikov M.Yu., Klimova I.D., Kanterov V.YA., Cejtlin G.M. // Paintwork materials and their application.1995. No 9–10. P. 23 –25. [in Russian]

11. Golovin V.A. Issledovanie desorbicii fosfonovyh kislot, prekursorov ingibitorov korrozii, iz polimernyh mikrokapсул [Study of desorption of phosphonic acids, precursors of corrosion inhibitors, from polymer microcapsules] / Golovin V.A., Ilin A.B., Aliev A.D., Shchelkov V.A., Rabinkov V.A. // The International Journal of Corrosion and Scale Inhibition 2018, 7, № 2, p. 165–174 DOI: 10.18334/np2570 [in Russian]

12. Golovin V.A. Massopereenos fosforsoderzhashchih ingibitorov korrozii v epoksidnyh zashchitnyh pokrytiah [Mass transfer of phosphorus-containing corrosion inhibitors in epoxy protective coatings] / Golovin V.A., Ilin A.B., Aliev A.D., Rabinkov V.A. // Corrosion: Materials, Protection, 2018. № 8, s. 18-24 DOI: 10.31044/1813-7016-2018-0-8-18-24 [in Russian]

13. Zaikov G.E. Diffuziya elektrolitov v polimerah [Diffusion of electrolytes in polymers] / Zaikov G.E., Iordanskij A.L., Markin V.S. // M.: Chemistry 1984. P. 152, 154 [in Russian]

14. Malkin A.Ja. Diffuzija i vjazkost' polimerov. Metody izmerenija [Diffusion and viscosity of polymers. Methods of measurement.] / Malkin A.Ja., Chalyh A.E. // – М.: Chemistry, – 1979. – P. 212-219. [in Russian]

15. Golovin V. A. Multilayer protective polymeric coatings: Providing for their continuity / Golovin V. A. // Protection of Metals 43(7): p.679-688 November 2007 DOI: 10.1134/S0033173207070119

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.90.12.010>

## УПРАВЛЕНИЕ ТРУДОВЫМИ РЕСУРСАМИ СТРОИТЕЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Научная статья

Долганов Д.О.<sup>1</sup>\*, Манохин П.Е.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ORCID ID 0000-0001-8379-6144;

<sup>1,2</sup> Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, Ижевск, Россия

\* Корреспондирующий автор (denisdolganov18[at]mail.ru)

### Аннотация

В статье показана актуальность управления трудовыми ресурсами в строительном производстве. Проанализированы проблемы повышения эффективности принимаемых решений. Раскрыто содержание стратегического решения в строительстве как совокупность основных функций. Раскрыта сущность планирования управления ресурсами через его функцию: постоянные и временные взаимоотношения подразделений строительного предприятия, порядок и условия их функционирования. Рассмотрен принцип процесса управления на предприятии как развитие вертикального разделения труда, то есть организация работы руководителей по координации деятельности всех подразделений строительного производства и исполнителей.

Проведен анализ структуры строительной организации. Показаны пути повышения эффективности управления трудовыми ресурсами.

**Ключевые слова:** трудовые ресурсы, структура строительной организации, функции управления, принципы действия процесса управления, трансформация, развитие строительного производства, единый фонд развития науки и техники в строительном производстве.

## HUMAN RESOURCES MANAGEMENT CONSTRUCTION COMPANY

Research article

Dolganov D.O.<sup>1</sup>\*, Manokhin A.P.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ORCID ID 0000-0001-8379-6144;

<sup>1,2</sup> Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

\* Corresponding author (denisdolganov18[at]mail.ru)

### Abstract

The article shows the relevance of human resources management in the construction industry. The problems of improving the efficiency of management decisions are analyzed. The content of the management decision through its main functions is revealed. The content of resource management planning through its function is disclosed: the establishment of permanent and temporary relationships between all departments of the construction enterprise, the definition of the order and conditions of their functioning. The principle of operation of the management process at the enterprise as the development of the vertical division of labor, that is, the organization of labor of managers to coordinate the activities of structural units and performers.

The analysis of the structure of the construction organization. The ways of increasing the efficiency of human resources management are shown.

**Keywords:** labor resources, structure of the construction organization, management functions, principles of operation of the management process, transformation, development of construction production, a single Fund for the development of science and technology in construction production.

### Введение

Основная задача менеджмента строительного производства заключается в непрерывном контроле состояния производственного процесса и воздействии на него в случае возникших отклонений от запланированного хода производства, а также разработке документации, обеспечении необходимыми трудовыми ресурсами.

### Основная часть

Процесс управления ресурсами подразумевает выполнение следующих функций: планирование, учет, организация, мотивация и контроль.

Составляя план, руководитель строит сложную социально-экономическую модель будущего строительного предприятия. Тип планирования каждого руководителя, зависит от его положения в организационной структуре предприятия. На высшем уровне выполняется долгосрочная перспектива, закладываются основы деятельности предприятия, оцениваются тенденции в его окружении, определяются предполагаемое поведение конкурентов.

На среднем уровне начальники- управленцы должны объединять и направлять свою деятельность на сотрудничество с другими. И это отражается в плане управления трудовыми ресурсами.

Нижний уровень планирования - оперативно- производственный. Оперативные планы содержат информацию о деятельности каждого специалиста, описание его работы.

Эффективность планирования — это функция управления трудовыми ресурсами, поэтому она во многом зависит от принципов планирования, которыми руководствуются при составлении планов: объем планирования, строгость планирования, убедительность планирования, недискретность планирования, выгодность планирования. [1]

В функции управления заложена деятельность по установлению взаимоотношений временных и постоянных между каждым подразделением строительного предприятия, в определении порядка и условий их работы.

Выделим основные функции управления:

- детализация целей предприятия;

- определение характера и содержания деятельности подразделений предприятия;
- поручение сформулированных задач каждой единице в структуре предприятия и объединение их в управляемые подразделения;
- координация деятельности подразделений, установление взаимоотношений между рабочими, ясное определение того, кто осуществляет руководство; каждый работник информирован о его деятельности, о сроках выполнения работ и о руководителях предприятия;
- наличие единых целей- весь производственный персонал должен работать на достижение одной общей цели;
- нормативы управляемости – количество подчиненного персонала одному менеджеру.

Десятью и более подчиненными управляют руководители высшего уровня, большим числом производственного персонала руководят управленцы низшего уровня.

Эффективность работы строительного производства определяется степенью и уровнем развития вертикального разделения труда, то есть организации труда руководителей по координации деятельности структурных подразделений и исполнителей. [2]

Принцип процесса управления представим на рис. 1



Рис. 1 – Принцип процесса управления на предприятии (сплошная линия — взаимодействия, прерывистая — информационные потоки)

Поведение производственного персонала — это всегда мотивированное действие. Мотивация является процессом побуждения к деятельности для достижения целей производства и личных целей. Мотивация производственного персонала дает возможность реализовать способности каждого в трудовом процессе. Она имеет две формы: материальная в виде премий, прибавок к заработной плате и т. п. и моральная — благодарности, награды и др.

Реализуя различные пути мотивации менеджер:

- устанавливает совокупность критериев, сильно влияющие на поведение персонала;
- создает благоприятную атмосферу мотивирующую персонал;
- активно общается с персоналом, четко представляет ожидания работников. [3]

Подчиненные должны знать, что ожидают от них менеджеры, им также необходимо поделиться мыслями о выполненной работе.

Контроль – это важная функция управления. Контроль – процесс сравнения поставленных целей и достигнутого результата.

Производя контроль, менеджер решают задачи:

- диагностирует состояние решаемого вопроса, получает информацию о предмете управления. Осуществляет обратную связь хода выполнения технологического процесса;
- ориентирует исполнителей на наиболее важные задачи, чаще контролируемые руководителем;
- стимулирует работников на качественное выполнение именно им принятого решения с привлечением дополнительных резервов;
- исправляет технологии решения, учитывая сложившуюся обстановку или принимает решение устранить отклонения от запланированной технологии;
- прививает ответственность и добросовестность исполнителям.

Требования, предъявляемые к контролю:

эффективность — малые расходы, которые связаны с выявлением и ликвидацией выявленных недостатков; уменьшение расходов на контроль, трат на работников и средства контроля; влияние на работников, то есть, выяснение, какие стимулы, положительные или отрицательные, вызывают применяемые методы, возможны ли при этом стрессовые реакции; задачи контроля — установление совпадений с запланированным контролем или отклонений от процесса управления предприятием; своевременное определение возможных отклонений от планового течения производства; соблюдение норм контроля, определенных действующим законодательством. [4]

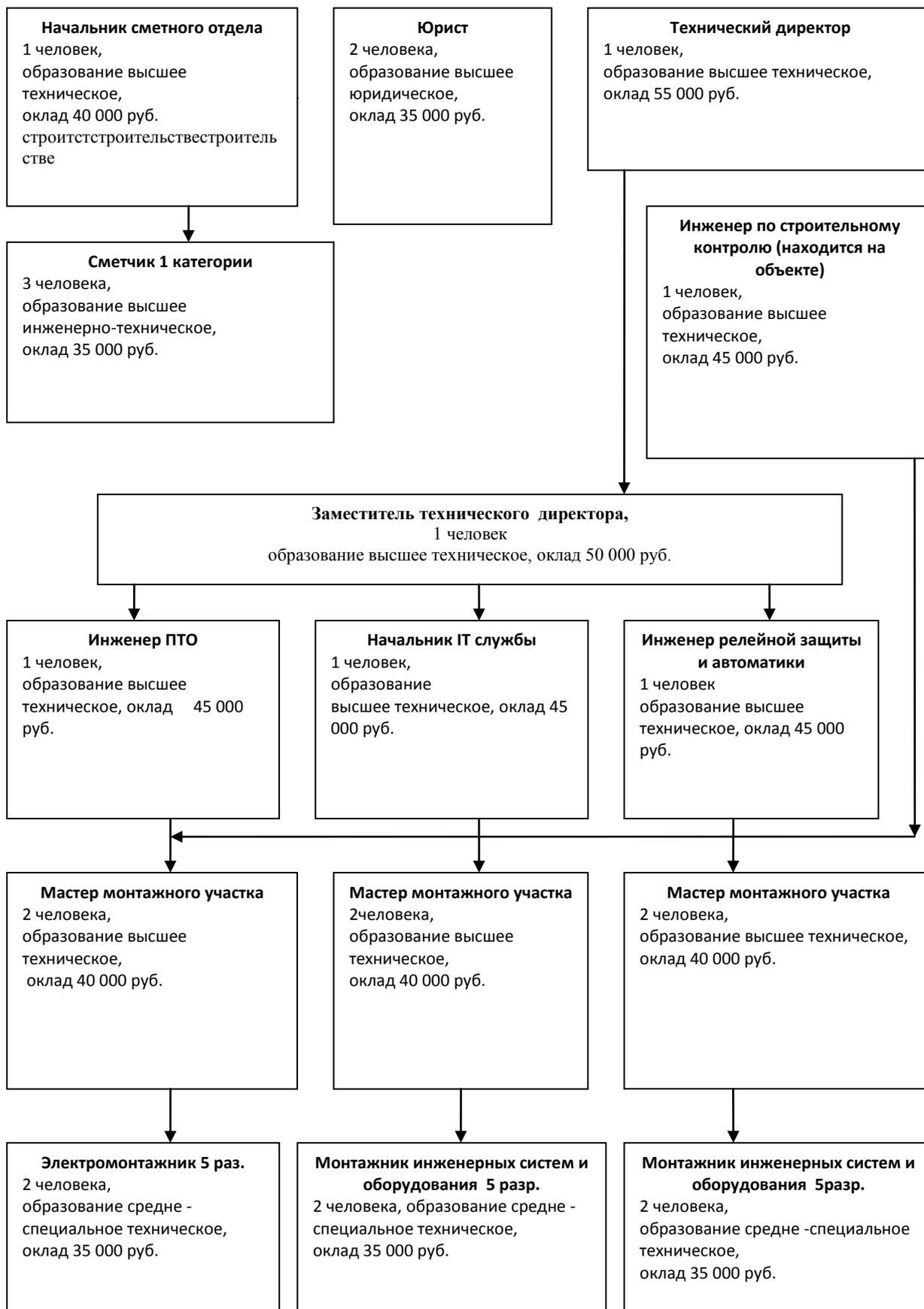


Рис. 2 – Структура строительной организации

Рассмотрим структуру строительной организации, выполняющей монтаж инженерных систем и оборудования. Выявим принцип действия управления.

На наш взгляд структура данной организации отражает систему планирования и экономического стимулирования строительного производства, так как структура включает в себя такие отделы как «Сметчик», «Юрист», «Технический директор», «Инженер по строительному контролю». Данные отделы несут ответственность за качество, рост технического уровня, рациональное использование трудовых ресурсов и повышение тем самым эффективности производства. Принцип действия управления соответствует вы указанной схеме. А так как схема принципа действия процесса управления включает важный элемент «Трансформация», предполагающий необходимость изменений в стиле и методах управления ресурсами. В структуре рассматриваемого нами предприятия отсутствует отдел, который бы отвечал за развитие и трансформацию предприятия.

Необходимы обоснованные соотношения между конечными результатами строительного производства и затратами на создание новой техники, более тесную связь между повышением эффективности производства и ресурсами, направленными на развитие технические обеспечения производства. Это может быть достигнуто путем определения объема ресурсов, направляемых на научно-исследовательские, опытно-конструкторские и технологические работы на основе стабильных нормативов, установленных в процентах к объему выпуска реализуемых строительных объектов [5].

Важнейшим элементом новой системы, способствующей эффективности управления в отрасли, является создание единого фонда развития науки и техники, а также принципиальное изменение порядка финансирования научных исследований, разработок в строительном производстве. Если раньше в данной строительной организации эти работы финансировались из средств госбюджета и отчислений от себестоимости реализуемых строительных объектов, то сейчас мы предлагаем источником формирования единого фонда развития науки и техники сделать прибыль от производственно-хозяйственной деятельности строительного предприятия.

За счет средств единого фонда развития науки и техники выделяются:

- ресурсы для научно-исследовательских, опытно-конструкторских, технологических и других видов работ по обеспечению научно-технического прогресса на предприятии;
- плановые и дополнительные затраты, связанные с подготовкой и освоением производства новых и модернизированных видов монтажа технологического оборудования, технологических процессов, повышением качества монтажных работ, а также с возмещением повышенных затрат первого года серийного выполнения новых монтажных работ.

Изменившийся порядок финансирования создания и внедрения новой техники, как показывает опыт, значительно повышает хозяйственную самостоятельность и ответственность отделов структуры предприятия за рациональное использование этих средств, создает единые источники финансирования всех стадий цикла «исследование — создание — освоение» и возможность оперативного перераспределения средств.

Образование единого фонда позволяет устранить негативное влияние на показатели эффективности повышенных затрат для освоения новых видов монтажных работ.

Измененная структура строительной организации предусматривает также прочные связи науки с производством, глубокое подчинение научных и проектных отделов предприятия интересам повышения эффективности управления ресурсами предприятия, качества монтажных работ [6].

Приведем новую структуру строительной организации, см. рис.3

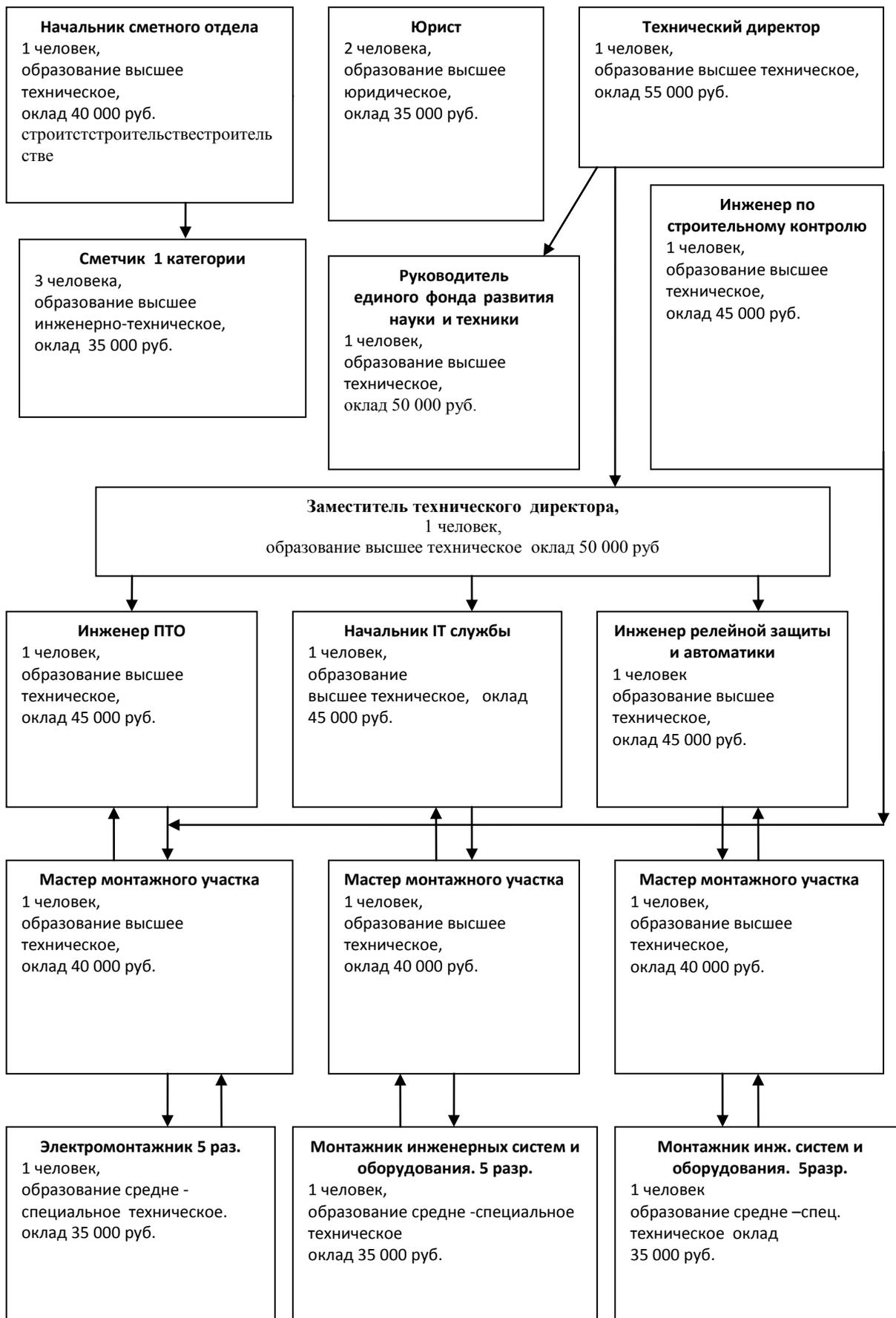


Рис. 3 – Эффективная структура строительной организации

Новая структура строительной организации так же предполагает экономию заработной платы путем сокращения мастеров монтажных участков, монтажников инженерных систем и оборудования (при необходимости). Экономия заработной платы составит  $40000 \times 3 + 35000 \times 3 = 225000$  руб.

Были опрошены 50 человек с высшим образованием и опытом работы в небольших строительных организациях. Им была предложена работа руководителя фонда развития науки и техники с окладом 50000 руб. (средняя по стране

оплата труда руководителей в строительной отрасли), 25000руб и совмещение этой должности с должностью инженера по строительному контролю. Результаты опроса покажем в таблице 1

Таблица 1 – Результаты опроса

Должность \ Оклад	50000	25000	Совмещение должности
Работа руководителя фонда развития науки и техники	45чел(90%)	5чел(10%)	-

Опрос показал, что на оклад в 25000руб согласились только 5% опрошенных. На совмещение должности никто из опрошенных технических работников с высшим образованием не согласился, основываясь на том, что данная должность достаточно трудоемкая и несет большую ответственность за результаты труда в строительной организации.

Внедрение новой должности предполагает постоянную трансформацию структуры строительной организации, расширение фонда развития науки и техники и появления научного коллектива, ведущего разработки по тематике.

#### **Выводы**

Таким образом, проведенный анализ существующей структуры строительной организации показал, что она не вполне соответствует принципам действия процесса управления на предприятии.

Было предложено:

- дополнить существующую структуру таким элементом как «фонд развития науки и техники» с введением новой должностной единицы «руководитель фонда» с окладом 50тыс руб.;

-предусмотреть обратную связь в ходе выполнения строительного-монтажного процесса и дальнейшее развитие новой структурной единицы;

-рекомендовать включить в самостоятельную хозяйственную деятельность предприятия работы по оказанию услуг по внедрению научной организации труда подобным организациям.

Основная идея статьи: измененная структура строительной организации предусматривает прочные связи науки с производством, глубокое подчинение научных и проектных отделов предприятия интересам повышения эффективности управления ресурсами предприятия, качества строительных работ, оперативное распределение средств, полученных в результате самостоятельной хозяйственной деятельности, основанной на научной организации труда.

Кроме того, данное предприятие сможет оказывать платные услуги по научной организации труда, а также применения и внедрения разработок другими предприятиями, решая, таким образом вопрос привлечения дополнительных источников дохода.

#### **Конфликт интересов**

Не указан.

#### **Conflict of Interest**

None declared.

#### **Список литературы / References**

1. Вороненко В.П. Строительное производство / Вороненко В.П. М. Высшая школа, «Академия», 2008.- 269с.
2. Выскубов В.П. Планирование в строительстве / Вороненко В.П. М. «Знание»,2008.-168с.
3. Силин В.А. Экономика: поиск, эксперимент / Вороненко В.П. М. «Знание»,2008. - 112с.

#### **Список литературы на английском языке / References in English**

1. Voronenko V.P. Stroitel'noe proizvodstvo [Building production] / Voronenko V.P. M. Higher school, «Academy», 2008 – 269p. [in Russian]
2. Viskubov V.P. Planirovanie v stroitel'stve [Planning in construction] / Voronenko V.P. M. «Knowledge», 2008. - 168p. [in Russian]
3. Silin V.A. Ekonomika: poisk, eksperiment [Economy: search, experiment] / Voronenko V.P. M. «Knowledge», 2008. - 112p. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.90.12.011>

## СИСТЕМА РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ

Научная статья

Пономарев Д.А.<sup>1</sup>, Кузьмина Т.О.<sup>2,\*</sup>

<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-1485-837X;

<sup>1,2</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)  
Санкт-Петербург, Россия

\* Корреспондирующий автор (tanasun1[at]mail.ru)

### Аннотация

Данная работа посвящена разработке системы реального времени для управления мобильным роботом. Система позволяет осуществлять телеуправление робота, либо его автономное движение к поставленной пользователем цели с объездом препятствий, с одновременными локализацией и построением карты.

Управление приводом и одометрия реализованы на плате stm32f7 nucleo с использованием операционной системы реального времени ChibiOS, а навигация на одноплатном компьютере raspberry PI 2B на основе пакетов ROS, таких как move\_base, gmapping и различных драйверов для взаимодействия с датчиками и микроконтроллером. Разработка включает в себя также реализацию режима симуляции с помощью пакетов gazebo\_ros.

Разработанная система управления была протестирована в симуляторе, а затем в помещении - поставленные ей задачи были успешно выполнены.

**Ключевые слова:** система управления, ROS, одновременная локализация и построение карты, навигация мобильного робота.

## SYSTEM FOR REAL-TIME MOBILE ROBOT CONTROL

Research article

Ponomarev D.A.<sup>1</sup>, Kuzmina T.O.<sup>2,\*</sup>

<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-1485-837X;

<sup>1,2</sup> St. Petersburg Electrotechnical University "LETI" (SPbETU "LETI"), Saint-Petersburg, Russia

\* Corresponding author (tanasun1[at]mail.ru)

### Abstract

This work is devoted to the development of a system for real-time mobile robot control. The system allows remote control of a robot, or its autonomous movement to the destination real-time by a user with a detour of obstacles, with simultaneous localization and map building.

Drive control and odometry are implemented on the stm32f7 nucleo board using the ChibiOS real-time operating system, and navigation on the raspberry PI 2B single-board computer is based on ROS packages such as move\_base, gmapping and various drivers for interacting with sensors and the microcontroller. Development also includes the implementation of a simulation mode using gazebo\_ros packages.

The developed control system was tested in the simulator, and then indoors – the tasks assigned to it were successfully completed.

**Keywords:** control system, ROS, simultaneous localization and map building, navigation of a mobile robot.

В робототехнике существуют следующие проблемы:

1. Слишком много времени уделяется для реализации программной инфраструктуры для создания сложных алгоритмов робототехники.

2. Слишком мало времени уделяется созданию интеллектуальных робототехнических систем на основе разработанных инфраструктур [1].

Как следствие из этих проблем, в мире программного обеспечения с открытым исходным кодом появился такой фреймворк, как ROS, который включает в себя огромное количество пакетов, реализующих те или иные функции в области робототехники, начиная от драйверов различных устройств, заканчивая стеком навигации [2].

Использование готовых пакетов, помимо решения указанных выше проблем, также позволяет значительно сократить время разработки [3], а значит и стоимость мобильного робота.

Обратная сторона использования ROS, как унифицированного решения, заключается, как предполагается, в сниженной производительности итоговой системы.

В данной работе осуществляется попытка реализовать систему управления мобильным роботом на основе пакетов ROS с целью проверить, какие преимущества и недостатки присущи им, для каких задач и в каких условиях их стоит использовать.

### Описание объекта управления

В качестве объекта управления был выбран мобильный робот с гусеничным движителем.

Для движения робота в пространстве и корректировки текущего положения и возможности избежать столкновения с препятствиями используются датчики одометрии и сканирования пространства. Также необходимы вычислительные устройства, система питания и модуль передачи данных оператору.

Структурная схема соединения устройств представлена на рисунке 1.

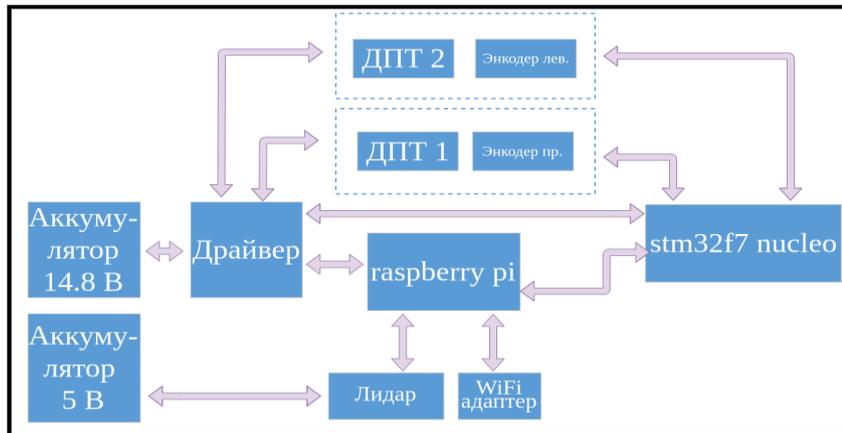


Рис 1 – Структурная схема мобильного робота

Примечание: набор используемых устройств представлен в таблице 1

Таблица 1 – Используемые устройства

Тип устройств	Устройства
Датчики	Лидар ydlidar x4, 2 энкодера
Привод	2 ДПТ GM25-370
Вычислительные устройства	raspberry PI 2B, stm32f7 nucleo
Система питания	Аккумуляторы на 14.8 и 5 В и силовой драйвер
Передача данных	WiFi адаптер TL-WN823N

Примечание: измерения характеристик мобильного робота представлены в таблице 2

Таблица 2 – Характеристики робота

Характеристика	Величина	Единица измерения
Длина робота	0.30	м
Ширина робота	0.30	м
Высота робота	0.28	м
Расстояние между гусеницами	0.23	м
Минимальная линейная скорость	0.1	м/с
Максимальная линейная скорость	0.15	м/с
Минимальная вращательная скорость	1	рад/с
Максимальная вращательная скорость	0.5	рад/с

Система управления роботом имеет иерархическую организацию и состоит из следующих уровней

1. Система управления высокого уровня: обработка данных датчиков, расчет кинематической траектории движения робота и генерация команд скорости. В данной работе именуется стеком навигации.

2. Система управления приводом, которая отвечает за четкое выполнение команды скорости.

Первый уровень выполняется на одноплатном компьютере с помощью соответствующих пакетов ROS. Система управления приводом реализована на микроконтроллере.

#### Стек навигации

Для осуществления навигации, т.е. вычисления оптимального маршрута проезда до заданной цели и последующего ведения по нему мобильного робота, используется пакет `move_base`. Этот пакет связывает работу двух плагинов: локального и глобального планировщиков [4].

Работу глобального планировщика описывает интерфейс `nav_core::BaseGlobalPlanner`. В качестве глобального планировщика в документации ROS предлагаются такие планеры, как `global_planner`, `navfn` и `carrot_planner`. В данной работе используется `navfn`. Этот планировщик с помощью алгоритма Дейкстры, используя глобальную карту стоимости, находит план движения от исходной позиции к конечной с минимальной стоимостью [5].

Работу локального планировщика описывает интерфейс `nav_core::BaseLocalPlanner`. Предлагаются такие планеры, как `base_local_planner`, `dwa_local_planner`, `eband_local_planner` и `teb_local_planner`. В данной работе используется `dwa_local_planner`. Планировщик, основанный на подходе динамического окна, получая глобальный план и карту стоимости, рассчитывает кинематическую траекторию и генерирует значение скорости, которое затем отправляется мобильному роботу. Алгоритм можно описать следующим образом:

1. Дискретная выборка возможных линейных и угловой скорости.
2. Для каждой выборки выполнение симуляции вперед на короткий промежуток времени.
3. Расчет эффективности каждой траектории движения, исключая траектории, в которых робот сталкивается с препятствием.
4. Выбор наиболее эффективной траектории и отправка команды скорости роботу.
5. Повторение цикла заново [6].

Построение карт стоимости можно выполнять с помощью таких пакетов, как `hector_mapping` и `gmapping`. Первый пакет использует для построения карты только данные с лидара. Второй пакет также дополнительно использует данные одометрии [7]. Поскольку в данной работе модуль одометрии присутствует, для повышения точности системы используется пакет `gmapping`.

Таким образом, пакет `gmapping` и локальный планировщик получают данные с соответствующих датчиков:

- лидар публикует информацию об окружающей среде в формате `sensor_msgs/LaserScan` в топик `/scan`.
- микроконтроллер считывает с энкодеров данные одометрии и затем в формате `nav_msgs/Odometry` публикует их в топик `/odom`.

После обработки этих данных, публикуется команда скорости формата `geometry_msgs/Twist` в топик `/cmd_vel`.

Взаимодействие узлов стека навигации упрощенно можно представить в виде схемы, представленной на рисунке 2 [9].

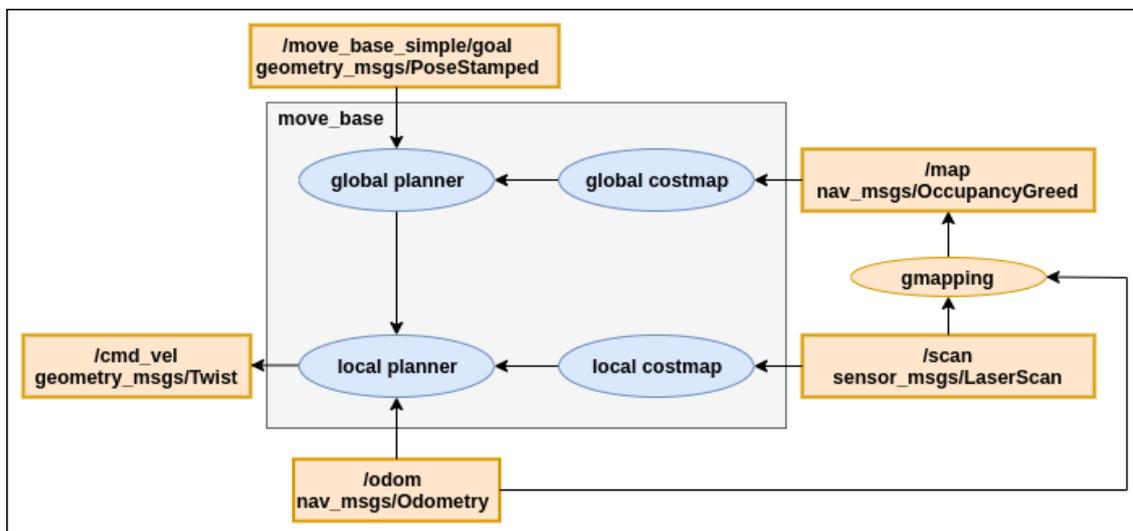


Рис. 2 – Иллюстрация стека навигации

На рисунке 2 эллипсы - узлы, а прямоугольниках - топики.

Упрощенно контур управления движением мобильного робота можно представить структурной схемой, изображенной на рисунке 3.

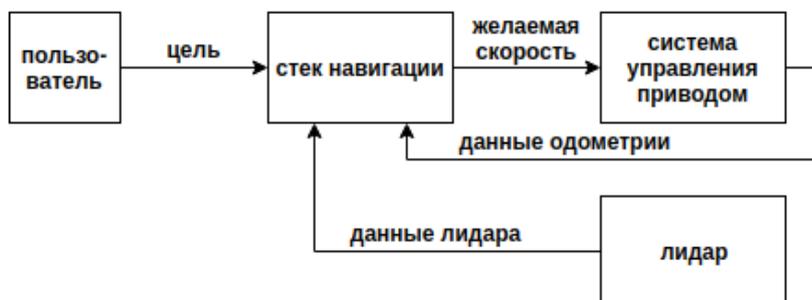


Рис. 3 – Высокоуровневый контур управления движением роботом

Таким образом, стек навигации обеспечивает контур управления роботом по его положению и по данным лидара.

### Система управления приводом

Задача системы управления приводом - задавать и поддерживать скорость, полученную от высокоуровневого контура. Формат команд скорости определяется ROS - `geom_msgs/Twist`[8]. Поскольку движение происходит в двумерном пространстве, нас интересуют только следующие составляющие данного формата: `float64 linear x`, `angular z`.

Систему управления приводом можно представить на рисунке 4.

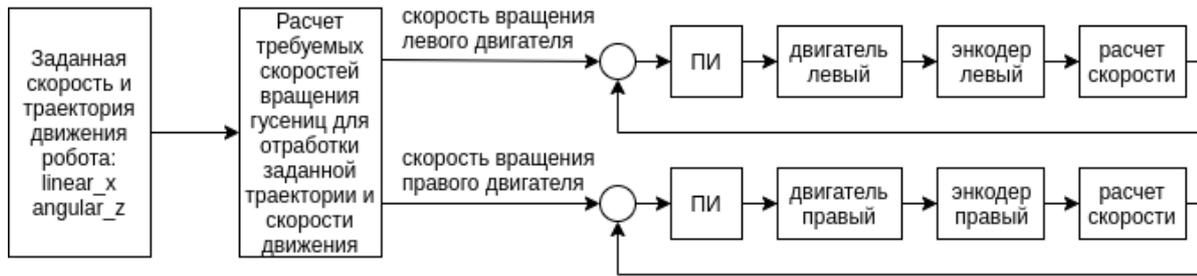


Рис. 4 – Низкоуровневый контур управления приводами

Для того, чтобы система управления приводом поддерживала желаемую скорость, необходимо решить уравнения движения робота, иными словами найти соответствие между желаемой скоростью робота и требуемыми значениями скоростей генерации импульсов энкодерами и значениями скважности ШИМ каждого из двигателей.

Линейная скорость робота, которая соответствует полю `linear.x` структуры `geom_msgs/Twist`, определяется по формуле

$$v_x = (e_1 + e_2)/2 * M, \quad (1)$$

где  $v_x$  - линейная скорость робота;

$e_i$  - скорость генерации импульсов -ого энкодера.

$M$  - константа, полученная опытным путем, которая учитывает количество импульсов, приходящих на один оборот энкодера - 300 импульсов, радиус вала, а также силу трения.

Вращательная составляющая скорости робота, которая соответствует полю `angular.z` экземпляра структуры `geom_msgs/Twist`, определяется следующим образом

$$w_z = (e_2 - e_1) * M/L, \quad (2)$$

где  $w_z$  - вращательная составляющая скорости робота;

$L$  - расстояние между гусеницами.

Данные скорости, рассчитанные по формулам (1) и (2), используются только внутри микроконтроллера ПИ-регуляторами для определения значения скважности ШИМ двигателей.

Для того, чтобы система управления задавала желаемую скорость, сначала требуется определить, какому типу движения соответствует поданная команда.

Среди типов движения робота выделяются следующие:

1. Прямолинейное движение, при котором значение поля `angular.z` равно нулю, а `linear.x` отлично от нуля. Требуется, чтобы скорость вращения гусениц, т.е. скорость генерации импульсов энкодеров, совпадали по значению и равнялись заданной скорости движения робота.

2. Вращательное движение на месте, при котором значение поля `linear.x` равно нулю, а `angular.z` отлично от нуля. Требуется, чтобы скорости вращения гусениц совпали по модулю, но были противоположны по направлению.

3. Криволинейное движение, при котором значения обоих полей отличны от нуля. Наиболее сложный вид движения.

С учетом формул (1) и (2) можно рассчитать требуемую скорость генерации импульсов каждого из энкодеров следующим образом:

$$\begin{cases} e_1 = v_x - L * v_z \\ e_2 = v_x + L * v_z \end{cases} \quad (3)$$

Рассчитанные скорости генерации импульсов используются как входы ПИ-регуляторов.

Для работы навигационного стека нижний уровень, помимо поддержания скорости, должен также возвращать текущее положение робота. Формат сообщения о положении робота описывается пользовательским типом данных `odometry_pose_t` и рассчитывается на основе данных энкодеров.

Поля структуры следующие:

- float x;
- float y;
- float dir.

Пройденный путь каждой гусеницы за время  $\Delta t$  рассчитывается

$$\Delta S_{x_i} = (E_{i \text{ current}} - E_{i \text{ previous}}) * M, \quad (4)$$

где  $\Delta S_{x_i}$  - пройденный путь  $i$ -ой гусеницы за время  $\Delta t$ ;

$E_{i \text{ current}}$  - текущее количество импульсов на  $i$ -ом энкодере;

$E_{i \text{ previous}}$  - прошлое количество импульсов на  $i$ -ом энкодере.

Путь  $\Delta S$ , пройденный роботом, рассчитывается, как среднее арифметическое путей, пройденных каждой гусеницей.

Тогда изменение угла робота в декартовой системе координат за время  $\Delta t$  определяются системой

$$\begin{aligned}\Delta S_z &= (\Delta S_{x_2} - \Delta S_{x_1})/L \\ \Delta S_x &= \Delta S * \cos(\Delta S_z) \\ \Delta S_y &= \Delta S * \sin(\Delta S_z),\end{aligned}\quad (5)$$

где  $\Delta S_z$ - изменение угла поворота робота;

$\Delta S_x$ - изменение положение робота по оси абсцисс;

$\Delta S_y$ - изменение положение робота по оси ординат.

Для оценки эффективности разработанной системы управления нижнего уровня, в частности подобранных коэффициентов регулятора, были проведены теоретические и практические тесты, в ходе которых последовательно раз в 2 секунды подавались команды с желаемыми скоростями: максимальная скорость вперед, максимальная скорость назад, остановка, повороты сначала влево, затем вправо на минимальной скорости, остановка.

Результаты теоретического тестирования регулятора в виде графиков переходных процессов представлены на рисунке 5.

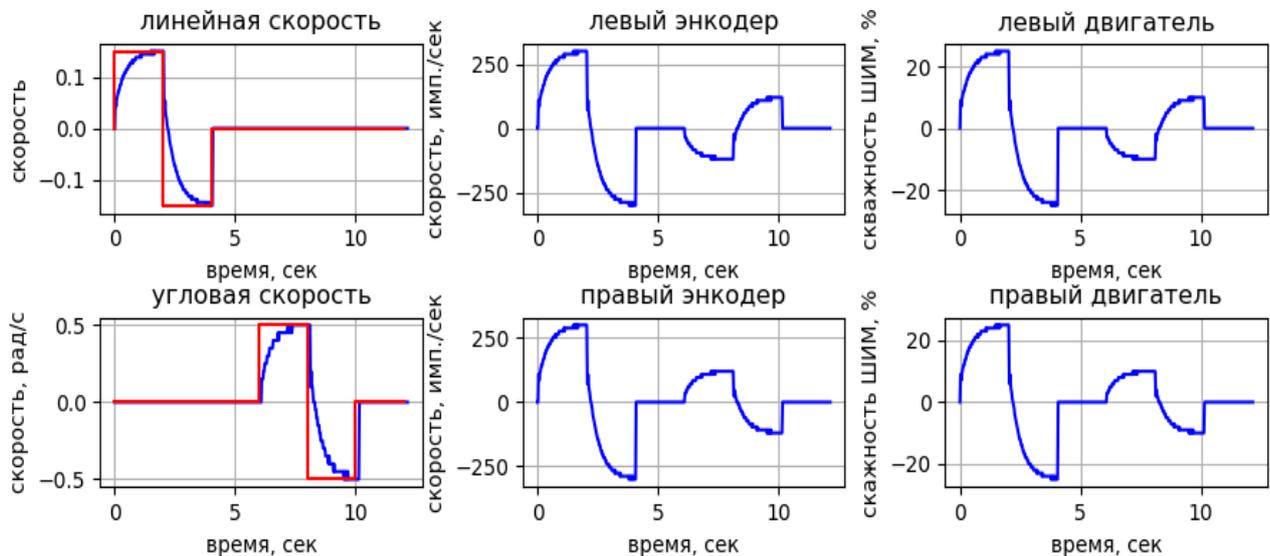


Рис. 5 – Теоретическое тестирование ПИ-регулятора последовательным изменением задаваемых скоростей

Результаты тестирования регулятора на реальном роботе представлены на рисунке 6.

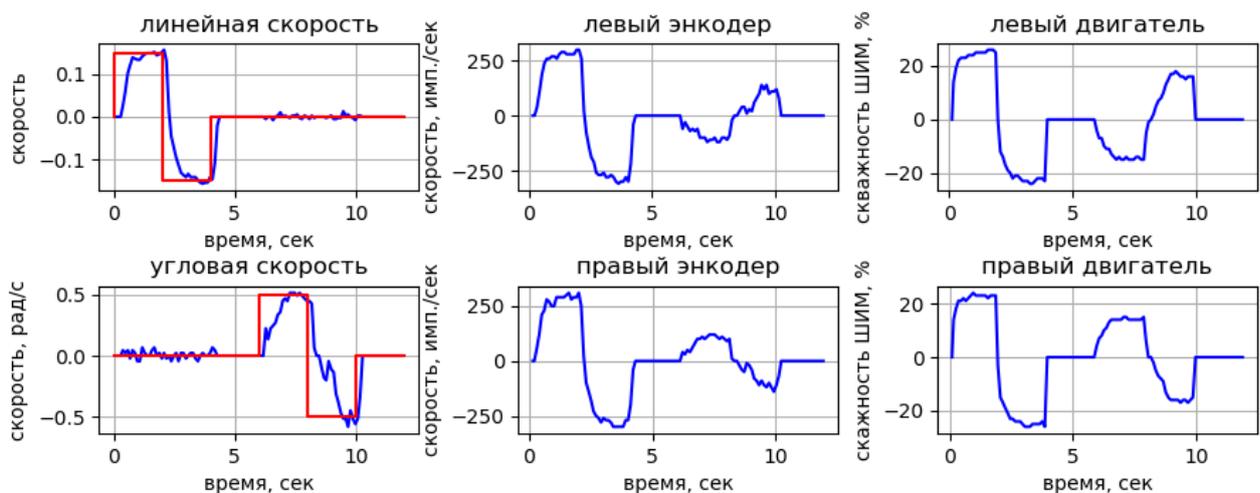


Рис. 6 – Тестирование ПИ-регулятора на реальном роботе последовательным изменением задаваемых скоростей

Красные линии соответствуют задаваемым линейной и угловой скоростям, а синие - фактические значения параметров робота: линейная и угловая скорости робота, скорости генерации импульсов энкодеров и скажности ШИМ двигателей.

Как видно из графиков, полученных при реальных тестах, время переходных процессов по скорости робота, скорости энкодеров и мощности двигателей, при задании скорости из состояния покоя, меньше секунды, а перерегулирование меньше 5%. В система присутствует небольшая колебательность, которая в основном связана с дискретностью показаний энкодеров.

Отличие теоретических графиков от реальных объясняется нелинейностями, присутствующими в реальном роботе.

Для системы управления нижнего уровня, в целях тестирования работы стека навигации, жесткие требования к качеству переходного процесса не ставились.

Таким образом, можно считать, что система управления нижнего уровня свою задачу выполняет.

#### Тестирование разработанной системы управления

Тестирование разработанной системы управления мобильным роботом проводилось в 2 этапа: сначала симуляция с помощью пакетов gazebo\_ros, затем реальный тест в помещении.

Для получения максимального эффекта от тестирования модели в режиме симуляции код программного обеспечения был разделен на 4 части:

1. Конфигурация робота - модули, запускаемые исключительно на роботе: драйвер лидара `ydliar_ros`, узел `rosserial_pythpn`, запускающий взаимодействие `raspberrу PI` и микроконтроллера, статические преобразование `tf` и другое.

2. Симуляция конфигурации робота - модули, запускаемые исключительно на компьютере, которые симулируют работу устройств.

В качестве модели робота используется модель робота `burger` из пакета `turtlebot3`.

3. Стек навигации - модули, которые могут запускаться как на компьютере, так и на мобильном роботе. К ним относятся `gmapping` и `move_base`. В первом случае будет включен полноценный режим симуляции, во втором - рабочий режим.

4. 3D визуализация данных датчиков и генерация задания роботу - запускается на компьютере.

Таким образом, при рабочей системе управления низкого уровня, корректной конфигурации робота и успешном тесте в режиме симуляции, потребность в тестах в реальных условиях минимизируется.

Иллюстрация взаимодействия частей такой системы представлена на рисунке 7.

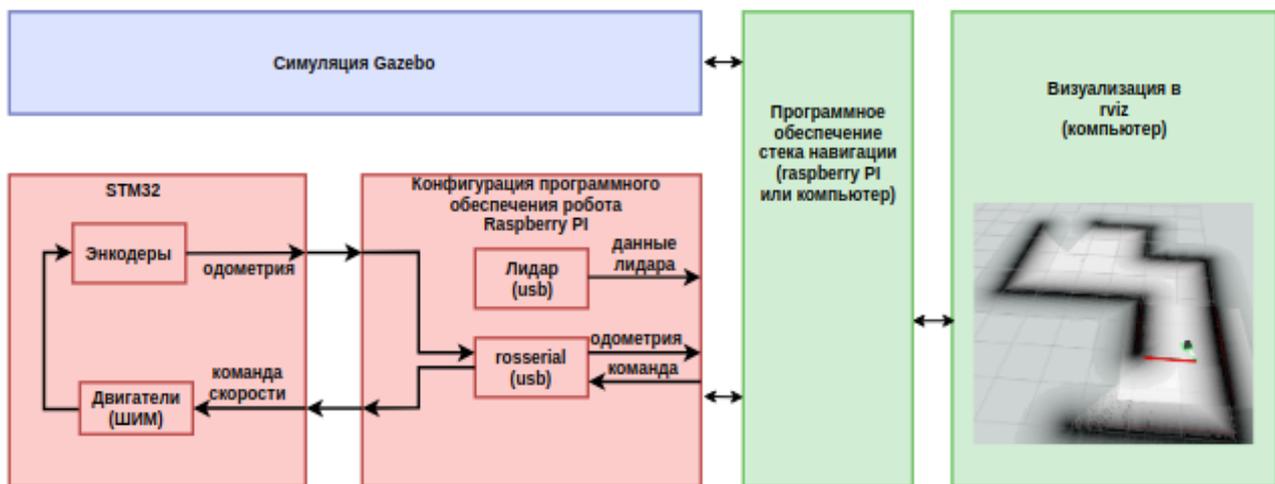


Рис. 7 – Принцип взаимодействия модулей программы

Тестирование высокоуровневой системы управления проводилось в симуляции на нескольких картах. Каждый раз робот успешно строил карту в незнакомой среде и двигался к цели без столкновения с препятствиями.

Пример созданного мира размером 10 на 10 метров в симуляторе Gazebo представлен на рисунке 8.

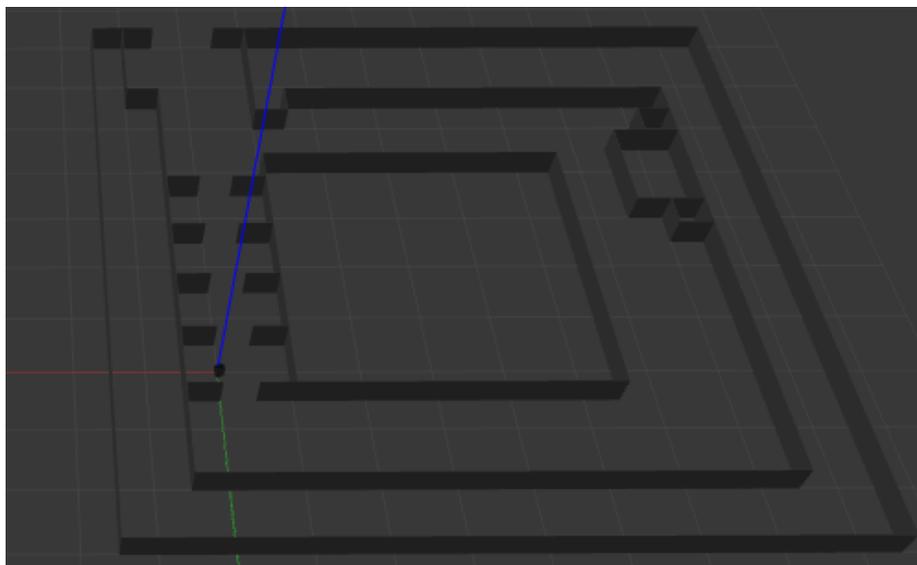


Рис. 8 – Тестовый мир 10 на 10 метров в симуляторе gazebo

На рисунке 9 показаны изображения экрана инструмента 3Д визуализации gviz в различные моменты движения робота от начальной позиции к желаемой.

Черным цветом обозначены препятствия, а области темно-серого цвета вокруг препятствий - это препятствия с учетом радиуса инфляции, принятым 0.5 метра. Они входят в расчет стоимости пути робота. Красная линия - это путь, рассчитанный глобальным планером. Зеленая линия - путь, рассчитанный локальным планером.

После достижения поставленной цели роботу была поставлена новая - вернуться в исходную позицию. Карта, построенная роботом за все время движения, представлена на рисунке 10.

Сравнивая мир, используемый для симуляции, и карту, построенную роботом, можно сделать вывод об успешности выполнения симуляции.

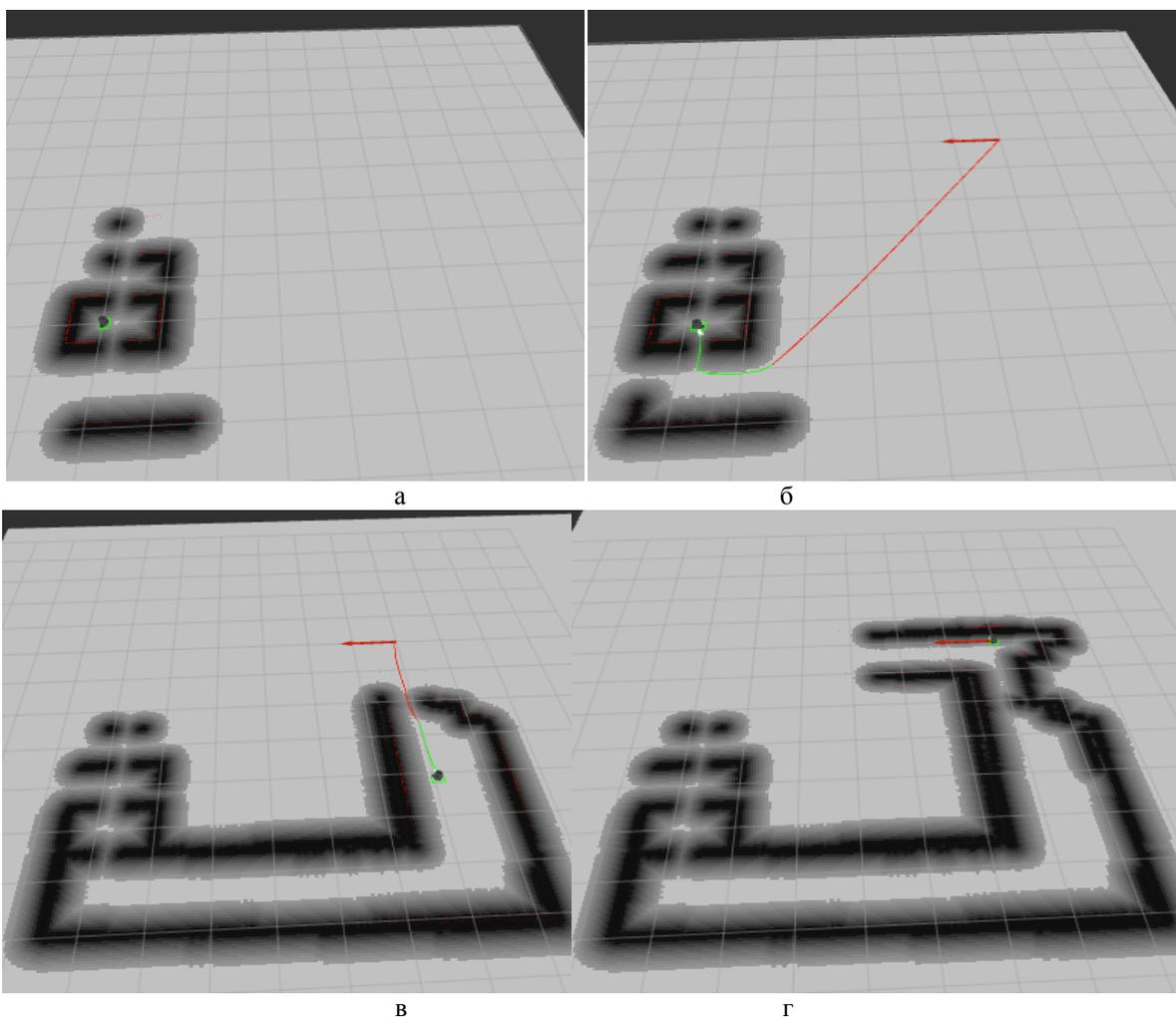


Рис. 9 – Движение робота к заданной позиции в симуляторе *а)* исходная позиция, *б)* постановка цели и начало движения, *в)* робот в процессе движения, *г)* конечная позиция

После завершения тестирования системы управления в режиме симуляции и тестирование отдельных низкоуровневых модулей на реальном роботе, например, тест ПИ-регулятора, был проведен ряд тестов реального робота в помещении.

В ходе реальных тестов робот, аналогично тестированию в симуляторе, осуществлял движение из одной точки помещения в другую, и обратно.

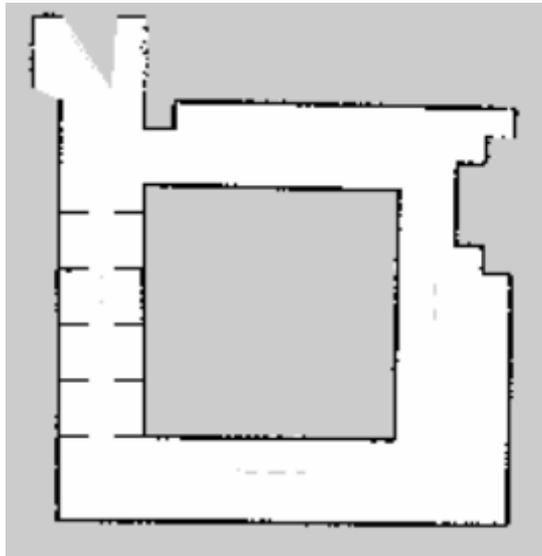


Рис. 10 – Построенная роботом карта

При тестировании уделялось внимание загрузке процессора raspberry PI. На рисунке 11 представлен график загрузки процессора, полученный при выполнении задачи навигации. Первые 10 секунд робот находился в состоянии покоя, оставшееся время осуществлял движение.

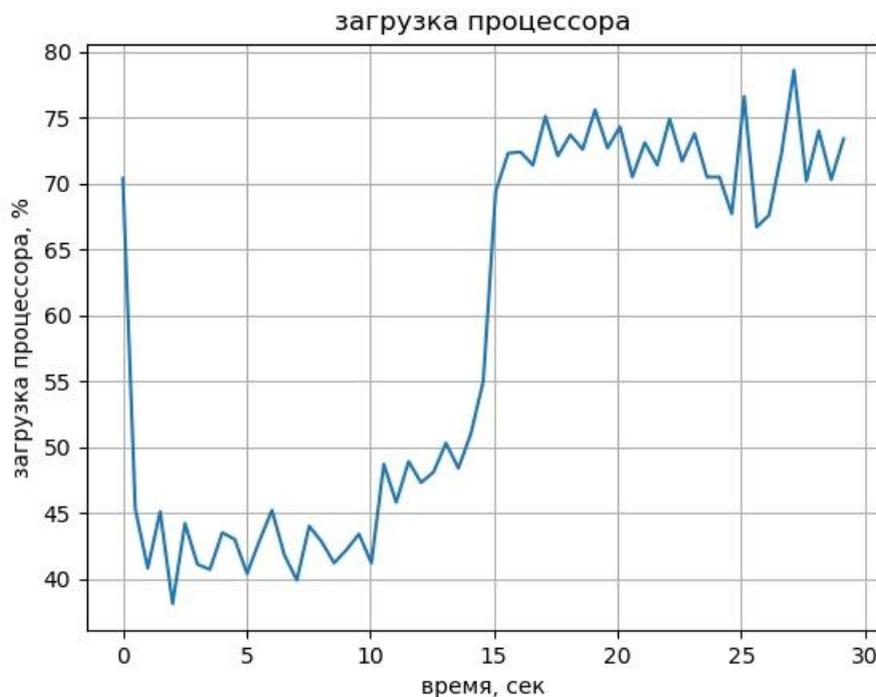


Рис. 11 – Загрузка процессора raspberry PI

Как видно из графика, вычислительное устройство обладает некоторым запасом производительности. Это означает, что можно еще улучшить некоторые параметры конфигурации, например увеличить размер карты стоимости для планировщиков, максимальную скорость робота, частоту изменения карты или изменить разрешение карты.

Таким образом, тестирование показало, что разработанная система успешно выполняет поставленные задачи.

#### **Заключение**

Разработанная система управления с использованием пакетов ROS была успешно протестирована и в режиме симуляции с помощью gazebo\_ros, и на реальном роботе.

Результаты тестирования показали, что стек навигации мобильного робота вполне может работать на современных бюджетных вычислительных устройствах, таких как одноплатный компьютер raspberry PI 2B, при этом даже получилось сохранить некоторый запас по производительности. При этом ROS значительно экономит время: конфигурация стека и соединение узлов выполняется довольно быстро, а симуляция с помощью пакета gazebo\_ros позволяет минимально взаимодействовать с аппаратной составляющей робота.

Из этого можно сделать вывод, что ROS очень хорошо подходит для разработки различных алгоритмов для роботов, а также для проведения исследований в области робототехники.

В ходе знакомства с ROS, разработки и тестирования системы было также замечено, что ROS использует не защищенные протоколы передачи данных, а попытка сделать протокол универсальным привела к тому, что, например,

в данной работе пакет `roscpp`, связывающий микроконтроллер с `Raspberry Pi`, нагружал процессор на 10%, что довольно много. Также выяснилось, что ROS не гарантирует реального времени. Такие недостатки делают применение ROS для коммерческих проектов, а также в областях, где требуется высокая надежность, нежелательным. Тем не менее, данные проблемы решаются в ROS2 [10].

**Конфликт интересов**

Не указан.

**Conflict of Interest**

None declared.

**Список литературы / References**

1. Tellez R. A History of ROS (Robot Operating System) [Электронный ресурс]/ R. Tellers // The construct for ROS developer – 2019. – URL: <https://www.theconstructsim.com/history-ros/> (дата обращения: 07.11.2019).
2. ROS/Introduction [Electronic resource] // ROS documentation. – 2018. – URL: <http://wiki.ros.org/ROS/Introduction> (accessed: 15.11.2019).
3. Каржаув А. OpenAI Gym+ROS+Gazebo: обучение автономного робота в домашних условиях. Часть 1 [Электронный ресурс] / А. Каржаув // Хабр. – 2019. URL: <https://habr.com/ru/post/441218/> (дата обращения: 18.10.2019).
4. `move_base` [Electronic resource] // ROS documentation. – 2018. – URL: [https://wiki.ros.org/move\\_base](https://wiki.ros.org/move_base) (accessed: 28.09.2019).
5. `navfn` [Electronic resource] // ROS documentation. – 2018. – URL: <https://wiki.ros.org/navfn> (accessed: 28.10.2019).
6. `dwa local planner` [Electronic resource] // ROS documentation. – 2018. – URL: [https://wiki.ros.org/dwa\\_local\\_planner](https://wiki.ros.org/dwa_local_planner) (accessed: 28.10.2019).
7. `gmapping` [Electronic resource] // ROS documentation. – 2018. – URL: <http://wiki.ros.org/gmapping> (accessed: 18.09.2019).
8. `geometry_msgs/Twist Message` [Electronic resource] // ROS documentation. – 2018. – URL: [https://docs.ros.org/api/geometry\\_msgs/html/msg/Twist.html](https://docs.ros.org/api/geometry_msgs/html/msg/Twist.html) (accessed: 18.09.2019).
9. Setup and Configuration of the Navigation Stack on a Robot [Electronic resource]// ROS documentation. – 2018. – URL: <http://wiki.ros.org/navigation/Tutorials/RobotSetup> (accessed: 18.09.2019).
10. Changes between ROS 1 and ROS 2 [Electronic resource] // ROS 2 Design. – 2019. – URL: <https://design.ros2.org/articles/changes.html> (accessed: 13.11.2019).

**Список литературы на английском языке/References in English**

1. Tellez R. A History of ROS (Robot Operating System) [Electronic resource]/ R. Tellers // The construct for ROS developer – 2019. – URL: <https://www.theconstructsim.com/history-ros/> (accessed: 07.11.2019).
2. ROS/Introduction [Electronic resource] // ROS documentation. – 2018. – URL: <http://wiki.ros.org/ROS/Introduction> (accessed: 15.11.2019).
3. Karzhauv A. OpenAI Gym+ROS+Gazebo: obuchenie avtonomnogo robota v domashnih usloviyah. Chast' 1 [OpenAI Gym+ROS+Gazebo: OpenAI Gym + ROS + Gazebo: training an autonomous robot at home. Part 1][Electronic resource] / A. Karzhauv // Habr. – 2019. URL: <https://habr.com/ru/post/441218/> (accessed: 18.10.2019) [in Russian]
4. `move_base` [Electronic resource] // ROS documentation. – 2018. – URL: [https://wiki.ros.org/move\\_base](https://wiki.ros.org/move_base) (accessed: 28.09.2019).
5. `navfn` [Electronic resource] // ROS documentation. – 2018. – URL: <https://wiki.ros.org/navfn> (accessed: 28.10.2019).
6. `dwa local planner` [Electronic resource] // ROS documentation. – 2018. – URL: [https://wiki.ros.org/dwa\\_local\\_planner](https://wiki.ros.org/dwa_local_planner) (accessed: 28.10.2019).
7. `gmapping` [Electronic resource] // ROS documentation. – 2018. – URL: <http://wiki.ros.org/gmapping> (accessed: 18.09.2019).
8. `geometry_msgs/Twist Message` [Electronic resource] // ROS documentation. – 2018. – URL: [https://docs.ros.org/api/geometry\\_msgs/html/msg/Twist.html](https://docs.ros.org/api/geometry_msgs/html/msg/Twist.html) (accessed: 18.09.2019).
9. Setup and Configuration of the Navigation Stack on a Robot [Electronic resource]// ROS documentation. – 2018. – URL: <http://wiki.ros.org/navigation/Tutorials/RobotSetup> (accessed: 18.09.2019).
10. Changes between ROS 1 and ROS 2 [Electronic resource] // ROS 2 Design. – 2019. – URL: <https://design.ros2.org/articles/changes.html> (accessed: 13.11.2019).

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.90.12.012>

## СОВРЕМЕННЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ОРГАНАМ ПО АККРЕДИТАЦИИ, АККРЕДИТУЮЩИМ ОРГАНЫ ПО ОЦЕНКЕ СООТВЕТСТВИЯ

Научная статья

Куликова П.А.<sup>1,\*</sup>, Панайтова Ю.А.<sup>2</sup>  
<sup>1,2</sup> РТУ МИРЭА, Москва, Россия

\* Корреспондирующий автор (kulikowapolina[at]gmail.com)

### Аннотация

Статья посвящена сравнительной оценке двух стандартов ГОСТ ISO/IEC 17011-2018 и ГОСТ Р ИСО/МЭК 17011-2008, которые определяют требования к органам по аккредитации, аккредитующим органы по оценке соответствия, а также анализу полученных результатов для определения значимости введения органами по аккредитации положений новой версии стандарта и принятия новых требований с целью соответствия им. Выполнение современных требований органами по аккредитации дает возможность улучшения результативности и эффективности осуществляемой деятельности.

**Ключевые слова:** орган по аккредитации, орган по оценке соответствия, информация по аккредитации.

## MODERN REQUIREMENTS FOR THE ACCREDITATION BODY ACCREDITING COMPLIANCE ASSESSMENT BODIES

Research article

Kulikova P.A.<sup>1,\*</sup>, Panaitova Yu.A.<sup>2</sup>  
<sup>1,2</sup> RTU MIREA, Moscow, Russia

\* Corresponding author (kulikowapolina[at]gmail.com)

### Abstract

The article is devoted to a comparative assessment of two standards: GOST ISO/IEC 17011-2018 and GOST R ISO/IEC 17011-2008, which determine the requirements for accreditation bodies accrediting conformity assessment bodies, as well as the analysis of the results obtained to determine the significance of the introduction of provisions of new versions of standards and the adoption of new requirements in order to comply with them by accreditation bodies. Fulfillment of modern requirements by accreditation bodies makes it possible to improve the effectiveness and efficiency of ongoing activities.

**Keywords:** accreditation body, conformity assessment body, accreditation information.

Аккредитацией называется независимая оценка органов по оценке соответствия на предмет соответствия общепризнанным стандартам для проведения конкретных мероприятий с целью обеспечения их беспристрастности и компетентности [1]. Обеспечение надзора органов по оценке соответствия со стороны более авторитетного органа является основной целью органов по аккредитации [2]. В РФ создана Федеральная служба по аккредитации (Росаккредитация) [3], выполняющая функции формирования единой национальной системы аккредитации [4]. Указанная служба создана в январе 2011 г. Указом Президента РФ №86 «О единой национальной системе аккредитации» [5].

Органу по аккредитации, занимающемуся оценением соответствия органов по оценке соответствия, следует иметь собственную хорошо отлаженную внутреннюю систему менеджмента. Достижение данной цели требует соответствия запросам определенных стандартов [6]. В данной статье приведен сравнительный анализ межгосударственного стандарта ГОСТ ISO/IEC 17011-2018 «Оценка соответствия. Требования к органам по аккредитации, аккредитующим органы по оценке соответствия» вступившего в силу 01.06.2019 [7] и предыдущей версии национального стандарта ГОСТ Р ИСО/МЭК 17011-2008 «Оценка соответствия. Общие требования к органам по аккредитации, аккредитующим органы по оценке соответствия» [8]. Детальное рассмотрение и последующая оценка призваны помочь органам по аккредитации РФ во внедрении положений новой версии стандарта ГОСТ ISO/IEC 17011-2018, так как процесс аккредитации очень важен для осуществления мониторинга и регулирования органов по оценке соответствия.

Международный статус новой версии стандарта дает возможность проводить стандартизацию работы органов по аккредитации в целях доверия к органам по оценке соответствия, аккредитованных в разных государствах [9].

Текущая версия стандарта отличается от предыдущей версии наличием некоторых определений, в частности, свидетельская оценка, удаленная оценка. Стоит отметить, что в новом стандарте расширен перечень органов по оценке соответствия. Главные отличия обозначены на рисунке 1.

В новом варианте документа имеется дополнение в подпункте «Требования к структуре». Орган по аккредитации обязан быть идентифицирован, если он относится и является частью какой-либо более масштабной организации. Вдобавок в усовершенствованной версии речь идет о расширении прав и ответственности высшего руководства органа по аккредитации. Подпункт «Беспристрастность» уточнен информацией о недопустимости коммерческого, финансового или альтернативного давления, действующего каким-либо образом на беспристрастность. Важное место в этом разделе занимает информация об идентификации рисков и возможных действиях, при обнаружении различных рисков.

Новый раздел «Общедоступная информация» перечисляет информацию, доступную для заинтересованных сторон, а также требования, предъявляемые к данной информации, содержит сведения о действиях, которые нужно предпринять, если требуется раскрыть конфиденциальную информацию. В подпункте «Финансирование и

обязательства» считается новым указанием по поводу проведения оценки рисков органом по аккредитации, оказывающих влияние на его работу, а также осуществлять меры, касающиеся покрытия обязательств, связанных с его деятельностью. В более старой версии отмечено, что орган по аккредитации надлежит предвидеть меры по обеспечению ответственности.

Раздел «Установление схем по аккредитации» говорит о необходимости определения пригодности схем оценки соответствия и стандартов для целей аккредитации. Новая версия документа перечисляет основные правила, касающиеся прекращения или частичного применения схемы аккредитации.

Важным отличием усовершенствованного стандарта является то, что он содержит информацию о необходимости принятия системы менеджмента согласно с двумя вариантами А и В. В разделе «Общие требования» описано, что содержит в себе каждый из вариантов системы менеджмента. Здесь же приводятся данные о постоянном улучшении результативности системы менеджмента.

В обновленной версии часть «Требования к процессу» содержит сведения о доступности процесса описания жалоб заинтересованным сторонам. Органу по аккредитации необходимо предоставлять отчеты о своей деятельности в отношении полученных жалоб, а также решения по жалобам и уведомление о завершении процесса их рассмотрения.

Подраздел «Персонал, вовлеченный в процесс аккредитации» разбит на составляющие «Персонал, участвующий в процессе аккредитации» и «Менеджмент компетентности». Новый подраздел «Менеджмент компетентности» содержит информацию, касающуюся обучения и мониторинга персонала. Появился новый раздел «Аутсорсинг», описывающий ход действий и обязанности органа по аккредитации по передаче принятых решений по аутсорсингу.

Раздел «Требования к процессу» содержит информацию, затрагивающую обманное поведение органа по оценке соответствия и действия, которые необходимо предпринимать в случае обнаружения свидетельств обманного поведения или намеренного представления ложной информации органу по аккредитации. Подраздел «Оценка» стал шире из-за содержания сведений о плане оценки, о документированной процедуре к подготовке отчетов, информации о действиях при обнаружении несоответствий и об ответственности за содержание отчетов по оценке.

Появился подраздел «Информация по аккредитации», перечисляющий сведения по оценке соответствия, которые должны быть предоставлены органом по аккредитации аккредитованному органу. Ранее представленные материалы приводились в разделе «Принятие решений об аккредитации». В этой части также указан материал про гибкую область аккредитации.

Что касается раздела «Апелляции», то он стал обширнее в новой версии стандарта. Здесь указаны элементы, из которых должен состоять процесс рассмотрения апелляции, а также сказано, что анализ и решения не должны выражаться в дискриминационных действиях.

Появился новый раздел «Цикл аккредитации», содержащий данные из раздела прошлой версии стандарта «Повторная оценка и инспекционный контроль». В новом варианте «Расширение аккредитации» более точно обозначена информация о документированной процедуре расширения области аккредитации, определении необходимой техники оценки для учета.

Подпункта «Записи, касающиеся органа по оценке соответствия» больше нет в стандарте, однако имеется раздел с главными требованиями под названием «Управление записями». Часть «Обязательства органа по аккредитации» отсутствует в новом стандарте. «Использование знака аккредитации и других ссылок на аккредитацию» более полно описан в новой версии стандарта с указанием потребности установления политики органа по аккредитации.

Так как Национальная система аккредитации представляет собой сложную многофункциональную структуру, она нуждается в систематическом, разностороннем анализе проходящих процессов [10]. Представленный сравнительный анализ выделяет отличия между документами и указывает на необходимость внедрения органами по аккредитации новых положений по аккредитации стандарта ГОСТ ISO/IEC 17011-2018 «Требования к органам по аккредитации, аккредитующим органы по оценке соответствия».

Таблица 1 – Основные отличия стандартов

ГОСТ ISO/IEC 1701-2018 «Оценка соответствия. Требования к органам по аккредитации, аккредитующим органы по оценке соответствия»	ГОСТР ИСО/МЭК 17011-2008 «Оценка соответствия. Общие требования к органам по аккредитации, аккредитующим органы по оценке соответствия»
1	2
Статус стандарта	
Межгосударственный	Национальный
Использованные ссылки	
ISO/IEC 1700 “Conformity assessment – Vocabulary principles” («Оценка соответствия. Словарь и общие принципы»)	ИСО 9000:2000 «Системы менеджмента качества менеджмента качества. Основные положения и словарь», ИСО/МЭК 17000:2004 «Оценка соответствия. Словарь и общие принципы», МСМ:1993 «Международный словарь основных и общих терминов в метрологии».
Термины и определения	
Расширение аккредитации	Аккредитация в дополнительной области
Сокращение аккредитации	Сокращение области аккредитации
Приостановление аккредитации	Приостановка аккредитации
Отмена аккредитации	Отмена действия аккредитации
Оценщик	Эксперт по аккредитации
Руководитель группы	Ведущий эксперт
Деятельность по оценке соответствия	-
Деятельность по аккредитации:	-
Процесс аккредитации	-
Решение по аккредитации	-
Предоставление аккредитации	-
Поддержание аккредитации	-
Повторная оценка	-
Техника оценки	-
Свидетельская оценка	-
Удаленная оценка	-
Программа оценки	-
План оценки	-
Персонал органа по аккредитации	-
Использованные понятия	
Беспристрастность	Доверие к проводимой аккредитации
Улучшение	Предупреждающие действия
Риски	Потенциальные несоответствия
Достаточность информации для принятия решения	Адекватность информации
Схемы по аккредитации	
Системы менеджмента А, В	
Гибкая область аккредитации.	

Окончание табл. 2 – Основные отличия стандартов

ГОСТ ISO/IEC 1701-2018 «Оценка соответствия. Требования к органам по аккредитации, аккредитующим органы по оценке соответствия»	ГОСТР ИСО/МЭК 17011-2008 «Оценка соответствия. Общие требования к органам по аккредитации, аккредитующим органы по оценке соответствия»
1	2
Органы по оценке соответствия	
Органы по сертификации Инспектирующие органы Калибровочные лаборатории Испытательные лаборатории Провайдеры проверки - Производители стандартных образцов Органы по валидации и верификации Другие органы по оценке соответствия	Органы по сертификации Инспектирующие органы Калибровочные лаборатории Испытательные лаборатории
Новые разделы	
Менеджмент компетентности Аутсорсинг Общедоступная информация соответствия Цикл аккредитации Приложение, устанавливающее необходимые знания и навыки для выполнения действий по аккредитации	Инспекционный контроль Записи, касающиеся организаций по оценке
Названия разделов	
Юридическое лицо Требования к структуре Требования к информации Установление схем по аккредитации Менеджмент Улучшение Требования к процессу Требования к ресурсам Требования к процессу Принятие решений по аккредитации  Информация по аккредитации Расширение аккредитации Соглашение по аккредитации	Правовая ответственность Структура Конфиденциальность Деятельность по аккредитации Требования к системе менеджмента Предупреждающие действия Жалобы Людские ресурсы Процесс аккредитации Анализ полученных данных и отчет по оценке Принятие решений об аккредитации Расширение области аккредитации Обязательства организации по оценке соответствия

**Конфликт интересов**

Не указан.

**Conflict of Interest**

None declared.

**Список литературы / References**

1. Официальный сайт ILAC [Электронный ресурс]. URL: <https://ilac.org/language-pages/russian/> (дата обращения: 04.10.2019)
2. Официальный сайт IAF [Электронный ресурс]. URL: <https://www.iaf.nu/articles/P109110891089108210801081/337> (дата обращения: 04.10.2019)
3. Официальный сайт национальной системы аккредитации [Электронный ресурс]. URL: <https://fsa.gov.ru/> (дата обращения: 10.10.2019)
4. Демиденко Г. Н., Медведев И. В., Сульман М. Г. Особенности реализации процедуры аккредитации органов по оценке соответствия в национальной системе аккредитации // Бюллетень науки и практики. Электрон. журн. 2017. №4 (17). С. 126–129. URL: <http://www.bulletennauki.com/demidenko-1> (дата обращения 15.09.2019)
5. Указ Президента РФ «О единой национальной системе аккредитации» №86 от 24.01.2011
6. Шалин А.П. Аккредитация – это путь к доверию / А.П. Шалин, В.Н. Батраков // Контроль качества продукции. – 2014. - №9. – С.44-48
7. ГОСТ ISO/IEC 17011-2018. Оценка соответствия. Требования к органам по аккредитации, аккредитующим органы по оценке соответствия. [Текст]. – М:Стандартинформ, 2018. – 26 с.
8. ГОСТ Р ИСО/МЭК 17011-2008. Оценка соответствия. Общие требования к органам по аккредитации, аккредитующим органы по оценке соответствия. [Текст]. – М:Стандартинформ, 2008. – 18 с.
9. Быкова Н. Испытано один раз – признано во всем мире / Н. Быкова // Стандарты и качество. – 2017. - №8. – С.7-11

10. Быкова Н. Концепция непрерывного совершенствования / Н.Быкова // Стандарты и качество. – 2017. - №7. – С.6-12

**Список литературы на английском языке / References in English**

1. Oficial'nyj sajt ILAC [ILAC official website] [Electronic resource] URL:<https://ilac.org/language-pages/russian/> (accessed: 04.10.2019) [in Russian]
2. Oficial'nyj sajt IAF [IAF official website] [Electronic resource] URL: <https://www.iaf.nu//articles/P109110891089108210801081/337> (accessed: 04.10.2019) [in Russian]
3. Oficial'nyj sajt nacional'noj sistemy akkreditacii [Official website of the national accreditation system] [Electronic resource] URL: <https://fsa.gov.ru/> (accessed: 10.10.2019) [in Russian]
4. Demidenko G. N. Osobnosti realizacii procedury akkreditacii organov po ocenke sootvetstviya v nacional'noj sisteme akkreditacii [Features of the implementation of the accreditation procedure of conformity assessment bodies in the national accreditation system] [Electronic resource] / Demidenko G. N., Medvedev I. V., Sul'man M. G. // Byulleten' nauki i praktiki [Science and Practice Bulletin]. Elektron. zhurn. 2017. №4 (17). P. 126–129. URL: <http://www.bulletennauki.com/demidenko-1> (accessed: 15.09.2019) [in Russian]
5. Ukaz Prezidenta RF «O edinoj nacional'noj sisteme akkreditacii» [Decree of the President of the Russian Federation “On the Unified National Accreditation System”] №86 ot 24.01.2011
6. Shalin A.P. Akkreditaciya – eto put' k doveriyu [Accreditation is the way to trust] / A.P. SHalin, V.N. Batrakov // Kontrol' kachestva produkcii [Product quality control]. – 2014. - №9. – 44-48 p. [in Russian]
7. GOST ISO/IES 17011-2018. Ocenka sootvetstviya. Trebovaniya k organam po akkreditacii, akkredituyushchim organy po ocenke sootvetstviya [Conformity assessment. Requirements for accreditation bodies accrediting conformity assessment bodies]. [Tekst]. – M:Standartinform, 2018. – 26 p. [in Russian]
8. GOST R ISO/MEK 17011-2008. Ocenka sootvetstviya Obshchie trebovaniya k organam po akkreditacii, akkredituyushchim organy po ocenke sootvetstviya [Conformity assessment. General requirements for accreditation bodies accrediting conformity assessment bodies]. – M:Standartinform, 2008. – 18 p. [in Russian]
9. Bykova N. Ispytano odin raz – priznano vo vsem mire [Tested once - recognized worldwide] / N. Bykova // Standarty i kachestvo [Standards and Quality]. – 2017. - №8. – P.7-11 [in Russian]
10. Bykova N. Konceptiya nepreryvnogo sovershenstvovaniya [Continuous Improvement Concept] / N.Bykova // Standarty i kachestvo [Standards and Quality]. – 2017. - №7. – P.6-12 [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.90.12.013>

## РАЗРАБОТКА ПОЛИМЕРНОЙ КОМПОЗИЦИИ ПОНИЖЕННОЙ ГОРЮЧЕСТИ НА ОСНОВЕ ПЛАСТИФИЦИРОВАННОГО ПОЛИВИНИЛХЛОРИДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ШЛАМОВОГО ОТХОДА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Научная статья

Ильина М.Е.<sup>1</sup>, Курочкин И.Н.<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-0405-2225;

<sup>2</sup> ORCID: 0000-0001-8742-5439;

<sup>1,2</sup> Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, Россия

\* Корреспондирующий автор (ivan33vl[at]yandex.ru)

### Аннотация

Представлены результаты разработки полимерной композиции пониженной горючести на основе пластифицированного поливинилхлорида с использованием в качестве антипиреновой добавки отхода машиностроительного производства – гальванического шлама. Данная полимерная композиция может найти применение в кабельной промышленности для изоляции внутренних и наружных оболочек проводов и кабелей. Введение в рецептуру пластифицированной ПВХ композиции гальваношлама в количестве 5-15 мас.ч. позволяет снизить горючесть кабельного пластиката, без ухудшения основных технологических параметров, таких как термостабильность и показатель текучести расплава.

Использование гальваношлама в качестве антипиреновой добавки в количестве 5-15 мас.ч. приводит к снижению себестоимости рецептуры кабельного пластиката, снижению его горючести, экономии материальных ресурсов, а также решению проблемы безопасной утилизации гальванического шлама.

**Ключевые слова:** полимерная композиция, пластифицированный поливинилхлорид, антипиреновая добавка, пониженная горючесть, гальванический шлам, безопасная утилизация.

## DEVELOPMENT OF POLYMER COMPOSITION WITH REDUCED FLAMMABILITY BASED ON PLASTICIZED POLYVINYL CHLORIDE USING SLUDGE WASTE FROM ENGINEERING PRODUCTION

Research article

Ilyina M.E.<sup>1</sup>, Kurochkin I.N.<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-0405-2225;

<sup>2</sup> ORCID: 0000-0001-8742-5439;

<sup>1,2</sup> Vladimir State University named after Alexandr and Nikolay Stoletovs, Vladimir, Russia

\* Corresponding author (ivan33vl[at]yandex.ru)

### Abstract

The paper presents the results of the development of a low flammability polymer composition based on plasticized polyvinyl chloride with the use of machine-building waste, galvanic sludge as a flame retardant. This polymer composition can be used in the cable industry for insulation of the inner and outer shells of wires and cables. Introduction of galvanic sludge to the formulation of plasticized PVC composition in the amount of 5-15 wt.h. allows us to reduce the flammability of cable compound, without deterioration of the main technological parameters, such as thermal stability and melt flow rate.

The use of galvanic sludge as a flame retardant additive in an amount of 5-15 wt.h. leads to a reduction in the cost of formulation of cable compound, reducing its combustibility, saving material resources, as well as solving the problem of safe disposal of galvanic sludge.

**Keywords:** polymer composition, plasticized polyvinyl chloride, flame retardant additive, low combustibility, galvanic sludge, safe disposal.

### Введение

Среди выпускаемых промышленностью синтетических полимеров поливинилхлорид (ПВХ), по масштабам использования, занимает одно из ведущих мест, так как посредством смешения ПВХ с различными компонентами получают большой ассортимент материалов и изделий, имеющих широкое применение в различных отраслях промышленности, сельского хозяйства, медицине и в быту [1], [2], [3]. В настоящее время большое и важное значение имеют полимерные композиции на основе пластифицированного поливинилхлорида, которые нашли широкое применение в кабельной промышленности для изоляции внутренних и наружных оболочек проводов и кабелей. Их производство относится к группе наиболее крупнотоннажных полимерных ПВХ материалов, применяемых в отечественной кабельной промышленности. Относительно невысокая цена на пластифицированные ПВХ композиции, по сравнению с другими полимерными материалами, оказала сильное влияние на их распространенность. Изоляция, выполненная на основе ПВХ композиций, устойчива к действию низких температур, агрессивных химических сред, обладает хорошими электроизоляционными, водоотталкивающими свойствами, хорошей эластичностью. В то же время, существенным недостатком пластифицированных ПВХ композиций является их низкая стойкость к термической деструкции и горючесть. Температура самовоспламенения поливинилхлорида составляет 495 °С, при этом процесс горения сопровождается выделением большого количества тепла и густого и плотного дыма, содержащего токсические вещества. Поэтому главной задачей при разработке современных рецептур кабельных пластикатов является снижение горючести и пожароопасности

пластифицированных ПВХ композиций, замена токсичных компонентов, входящих в состав рецептур, на менее опасные.

Для снижения горючести и дымообразования кабельных пластикатов на основе пластифицированных ПВХ композиций, в их состав вводят антипиреновые добавки, в роли которых могут выступать различные органические и неорганические соединения (трехокись сурьмы, бром-, хлор- и фосфорорганические соединения, аммонийные соли фосфорной и серной кислоты, гидроксиды металлов и т.д.). Применение антипиренов значительно затрудняет воспламенение ПВХ композиций, снижает скорость распространения огня, приводит к снижению дымообразования и эмиссии опасного хлористого водорода.

Основными недостатками антипиренов является их высокая стоимость и токсичность. В данной работе рассматривается возможность использования в качестве антипиреновой добавки для полимерной композиции на основе пластифицированного ПВХ отхода машиностроительного производства – гальванического шлама. Цель работы – снижение горючести полимерной композиции для изоляции внутренних и наружных оболочек проводов и кабелей за счет использования в качестве антипиреновой добавки гальванического шлама.

#### Объекты и методы исследования

Для получения образцов материала в данном исследовании использовался состав уже известной ПВХ композиции для кабельного пластиката, содержащей суспензионный поливинилхлорид, сложноэфирный пластификатор, хлорированный парафин, термостабилизаторы – трехосновный сульфат свинца и стеарат кальция, антипирены – гидроксид алюминия и трехокись сурьмы и пигмент [4], но в котором антипирены гидроксид алюминия и трехокись сурьмы были заменены на отход машиностроительного предприятия – гальванический шлам в количестве 5-15 мас.ч. В рецептуре получения образцов использовался суспензионный поливинилхлорид марки ПВХ С 7058М по ГОСТ 14332-78. В качестве сложноэфирного пластификатора – диоктилфталат (ДОФ) по ГОСТ 8728-88. В качестве пигмента использовалась сажа марки К-354 по ГОСТ 7885-86.

В качестве антипиреновой добавки использовался просушенный и тонкоизмельченный гальванический шлам, полученный после реагентной обработки гидроксидом кальция сточных вод гальванического производства машиностроительного предприятия г. Владимира. Гальванический шлам просушивался при  $T=130^{\circ}\text{C}$  и подвергается тонкому помолу на шаровой мельнице. Полученный порошкообразный продукт, содержащий гидроксиды металлов, имел степень перетира не более 40 мкм по ГОСТ 6589-74. Для определения элементного количественного состава гальванического шлама был использован рентгенофлуоресцентный метод, с использованием прибора «Спектроскан МАКС - G». Результаты анализа элементного состава гальванического шлама, используемого в качестве антипирена, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Элементный состав антипирена – гальваношлама

Элемент (в составе гидроксида или оксида)	Количество, %
Zn	10,96
Cu	1,68
Ca	32,84
Ni	4,36
Co	0,01
Fe	6,84
Mn	0,22
Cr	8,4
Si, O, H	остальное

Образцы ПВХ композиций готовили по следующей технологии: в смеситель, нагретый до  $90^{\circ}\text{C}$ , загружали сыпучие компоненты, мас.ч.: суспензионный поливинилхлорид – 100, трехосновный сульфат свинца – 5, стеарат кальция – 1,5, гальванический шлам – 5-15, сажу – 1, перемешивали в течение 3-5 мин, затем вводили ДОФ – 70 и хлорированный парафин – 15, перемешивали в течение 20-25 минут. Полученную смесь охлаждали до комнатной температуры и вальцевали при температуре  $155-165^{\circ}\text{C}$  в течение 4-10 мин. Из вальцованного образца прессовали образцы для испытаний при температуре  $160-170^{\circ}\text{C}$  в течение 3 мин под давлением  $120 \text{ кгс/см}^2$ .

Технические характеристики образцов разработанных пластифицированных ПВХ композиций определялись по следующим методикам: горючесть – методом определения кислородного индекса по ГОСТ 21793-76, термостабильность – по ГОСТ 14041-91, показатель текучести расплава – по ГОСТ 11645-73.

#### Результаты и обсуждение

В настоящее время, гальваношлам машиностроительных предприятий, в силу отсутствия эффективных технологий и технических решений его переработки и утилизации, продолжает накапливаться, как на территориях самих предприятий, так и на полигонах по захоронению промышленных отходов, что в ближайшем будущем может привести к негативным экологическим, экономическим и социальным последствиям.

Использование гальваношлама в качестве многофункциональной полезной добавки способствует решению задачи сокращения объемов техногенных промышленных отходов. Так, известно использование гальваношлама в производстве керамических строительных [5], [6] и облицовочных изделий [7], [8], в качестве пигмента-наполнителя в лакокрасочных покрытиях [9], [10], в качестве антипиреновой добавки в защитных эпоксидных покрытиях [11], в рецептурах бетонных смесей и бетонов [12] и т.д. В данной работе предлагается использовать гальваношлам в качестве антипиреновой добавки в пластифицированных ПВХ композициях кабельного пластиката.

Как видно из таблицы 1, наибольшее содержание в антипирене-гальваношламе имеют гидроксиды металлов кальция, цинка, хрома и железа. Можно предположить, что использование тонкоизмельченного гальванического шлама, содержащего гидроксиды металлов в качестве антипиреновой добавки позволит снизить горючесть композиции, за счет поглощения большого количества тепла, выделяемого при горении ПВХ композиции, будет способствовать нейтрализации кислых газов (в данном случае хлористого водорода, который выделяется при горении поливинилхлорида), что должно снизить дымообразование, а также дать возможность удешевить и снизить токсичность композиции (данный гальванический шлам имеет 3 класс опасности [13], по сравнению с трехокисью сурьмы, имеющей 2 класс опасности), при этом технологические характеристики изделий из пластифицированного ПВХ не должны ухудшиться. Механизм действия антипирена – гальваношлама заключается в том, что в случае воздействия высоких температур (например, при пожаре) гидроксиды металлов, содержащиеся в гальваношламе, разлагаются на оксиды металлов и воду, при этом реакция разложения является эндотермической, что приводит к охлаждению полимерной структуры ПВХ композиций до температуры ниже точки воспламенения. Образовавшиеся водяные пары способствуют разбавлению горючих газов, выделяющихся при горении ПВХ полимера, ослаблению действия кислорода и уменьшению скорости горения. При этом образующиеся оксиды металлов в результате воздействия высоких температур создают теплоизолирующий слой, способствующий прекращению горения и воспламенения участков полимерной ПВХ композиции.

Для проведения исследований на горючесть и определения основных технологических показателей были изготовлены образцы пластифицированной ПВХ композиции с содержанием гальванического шлама 5, 10, 15 мас.ч. соответственно.

Показатели образцов, полученные с использованием известной и разработанной ПВХ композиции, приведены в таблице 2.

Таблица 2

Наименование показателей	ПВХ композиция			
	Известная	Разработанная с добавкой антипирена-гальваношлама, мас.ч.		
		5	15	10
1. Горючесть по кислородному индексу, %	33	33	36	34
2. Термостабильность при 175°C, ч	9,5	10	9	9,5
3. Показатель текучести расплава, г/10 мин	85	90	80	85

Из таблицы видно, что введение в состав разработанной рецептуры пластифицированной ПВХ композиции антипиреновой добавки – гальванического шлама в количестве 5-15 мас.ч., приводит к снижению горючести и, как следствие, уменьшению дымообразования с выделением токсичных веществ, при этом не происходит ухудшения других важных технологических характеристик ПВХ композиции.

Использование гальваношлама в качестве антипиреновой добавки приводит к снижению себестоимости рецептуры кабельного пластиката на основе пластифицированной ПВХ композиции, снижению его горючести, экономии материальных ресурсов, а также способствует решению проблемы безопасной утилизации гальванического шлама.

**Конфликт интересов**

Не указан.

**Conflict of Interest**

None declared.

**Список литературы / References**

1. Колосова А.С. Современные полимерные композиционные материалы и их применение / Колосова А.С., Сокольская М.К., Виткалова И.А. и др. // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2018. № 5. С. 245-256.
2. Сокольская М.К. Связующие для получения современных полимерных композиционных материалов / Сокольская М.К., Колосова А.С., Виткалова И.А. и др. // Фундаментальные исследования. 2017. №10-2. С. 290-295.
3. Виткалова И.А. Разработка способа получения облицовочного композиционного материала на основе полимерных и стекольных отходов / Виткалова И.А., Торлова А.С., Пикалов Е.С. и др. // Экология промышленного производства. 2018. № 3. С. 2-6.
4. Патент РФ № 2321090 Поливинилхлоридный кабельный пластикат пониженной горючести. 27.03.2008 г. Бюл. № 9.
5. Маркова А.А. Комплексная утилизация отходов Владимирской области в производстве высокопрочной строительной керамики из местной малопластичной глины / Маркова А.А., Пикалов Е.С., Селиванов О.Г. и др. // Экология промышленного производства. 2016. № 3 (95). С. 14-17.
6. Наумов В.И. Утилизация шламов гальванических производств / Наумов В.И., Наумов Ю.И., Галкин А.Л., Сазонтьева Т.В. // Гальванотехника и обработка поверхности. 2009. № 3. С.41-47.
7. Воробьева А.А. Получение облицовочной керамики с эффектом остекловывания на основе малопластичной глины и техногенного отхода Владимирской области / Воробьева А.А., Шахова В.Н., Пикалов Е.С. и др. // Стекло и керамика. 2018. №2. С. 13-17.
8. Виткалова И.А. Использование отходов, содержащих тяжелые металлы, для получения кислотоупорной керамики с эффектом самоглазурования / Виткалова И.А., Торлова А.С., Пикалов Е.С. и др. // Экология промышленного производства. 2018. № 2(102). С.2-6.

9. Чухланов В.Ю. Новые лакокрасочные материалы на основе модифицированных пипериленистирольных связующих с использованием гальваношлама в качестве наполнителя / Чухланов В.Ю., Усачева Ю.В., Селиванов О.Г., и др. // Лакокрасочные материалы и их применение. 2012. №12. С. 52-55.

10. Ладыгина О.В. Исследование антикоррозионных свойств малотоксичных пигментов – ферритов на основе гальваношламов и содержащих их грунтовок / Ладыгина О.В., Макаров В.М., Индейкин Е.А. и др. // Лакокрасочные материалы и их применение. 2000. № 4. С. 26 – 28.

11. Курочкин И.Н. Применение отходов гальванического производства для повышения огнестойкости полимерных защитных покрытий. Курочкин И.Н. // Международный научно-исследовательский журнал. 2019. № 9-1(87). С. 36-39.

12. Генцер И. В. Влияние гальванических осадков на свойства бетонных смесей и бетонов / Курочкин И.Н., Ильина М.Е. // Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1996. №7. С. 67-70.

13. Трифонова Т.А., Проблемы утилизации ТБО на полигонах / Трифонова Т.А., Селиванова Н.В., Ширкин Л.А. и др. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т.5. № 3-2. С.685-687.

#### Список литературы на английском языке / References in English

1. Kolosova A.S. Sovremennye polimernye kompozicionnye materialy i ikh primeneniye [Modern polymer composite materials and their application] / Kolosova A.S., Sokol'skaya M.K., Vitkalova I.A. et al // Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy [International journal of applied and fundamental research] 2018. №5. p. 245-256. [in Russian]

2. Sokol'skaja M.K. Svjazujushhie dlja polucheniya sovremennykh polimernykh kompozicionnykh materialov [Binders for production of modern polymeric composite materials] / Sokol'skaja M.K., Kolosova A.S., Vitkalova I.A. et al // Fundamental'nye issledovaniya [Fundamental study] 2017. №10-2. p. 290-295. [in Russian]

3. Vitkalova I.A. Razrabotka sposoba polucheniya oblicovochnogo kompozicionnogo materiala na osnove polimernykh i stekol'nyh othodov [Development of a method for obtaining a facing composite material based on polymer and glass waste] / Vitkalova I.A., Torlova A.S., Pikalov E.S. et al // Ekologiya promyshlennogo proizvodstva [Ecology of industrial production] 2018. №3. p. 2-6. [in Russian]

4. Russian patent No. 2321090 Polivinilhlordnyj kabel'nyj plastikat ponizhennoj goryuchesti [Polyvinyl chloride cable plasticate reduced flammability]. 27.03.2008. Bul. No. 9. [in Russian]

5. Markova A.A. Kompleksnaya utilizaciya othodov Vladimirskoj oblasti v proizvodstve vysokoprochnoj stroitel'noj keramiki iz mestnoj maloplastichnoj gliny [Complex utilization of wastes of Vladimir region in production of high-strength building ceramics from local low-plastic clay] / Markova A.A., Pikalov E.S., Selivanov O.G. et al // Ekologiya promyshlennogo proizvodstva [Ecology of industrial production]. 2016. №3. p.14-17. [in Russian]

6. Naumov V.I. Utilizaciya shlamov gal'vanicheskikh proizvodstv [Disposal of sludge electroplating plants] / Naumov V.I., Naumov YU.I., Galkin A.L. et al // Gal'vanotekhnika i obrabotka poverhnosti [Electroplating and surface treatment]. 2009. № 3. p.41-47. [in Russian]

7. Vorob'eva A.A. Poluchenie oblitovochnoy keramiki s efektom osteklovyvaniya na osnove maloplastichnoj glini I tekhnogenno othoda Vladimirskoy oblasti [Production of facing ceramics with the effect of glazing on the basis of low-plastic clay and technogenic waste of the Vladimir region] / Vorob'eva A.A., Shahova V.N., Pikalov E.S. et. al. // Steklo o keramika [Glass and ceramics]. 2018. №2. P.13-17. [in Russian]

8. Vitkalova I.A. Ispol'zovanie othodov, sodержashchih tyazhelye metally, dlja polucheniya kislotoupornoj keramiki s efektom samoglazurovaniya [The use of waste containing heavy metals to produce acid-resistant ceramics with the effect of self-glazing] // Vitkalova I.A., Torlova A.S., Pikalov E.S. et al // Ekologiya promyshlennogo proizvodstva [Ecology of industrial production]. 2018. №2. p. 2-6. [in Russian]

9. Chukhlanov V.Y. Novye lakokrasochnye materialy na osnove modifitsirovannykh piperilenstirolnykh svyazuyushchih s ispol'zovaniem gal'vanoshlama v kachestve napolnitelya [New paint and varnish materials based on modified piperylene styrene binders using galvanic sludge as a filler] // Chukhlanov V.Y., Usacheva Y.V., Selivanov O.G. et al // Lakokrasochnye materialy i ikh primeneniye [Paint and varnish materials and their application]. 2012. №12. p. 52-55. [in Russian]

10. Ladygina O.V. Issledovanie antikorrozionnykh svojstv malotoksichnykh pigmentov – ferritov na osnove galvanostatic containing primers] / Ladygina O.V., Makarov V.M., Indejkin E.A. et al // Lakokrasochnye materialy i ikh primeneniye [Paint and varnish materials and their application]. 2000. № 4. p. 26-28. [in Russian]

11. Kurochkin I.N. Primeneniye otkhodov galvanicheskogo proizvodstva dlja povysheniya ognestoykosti polimernykh zaschitnykh pokrytii [Application of wastes of electrodeposition for the increase of fire resistance of polymeric protective coatings] / Kurochkin I.N., Ilina M.E. // Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal [International research journal]. 2019. №9-1 (87). P. 36-39. [in Russian]

12. Gencer I.V. Vliyanie gal'vanicheskikh osadkov na svojstva betonnykh smesey i betonov [Effect of galvanic precipitation on the properties of concrete mixtures and concretes] / Gencer I.V. // Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arhitektura [News of universities. Construction and architecture]. 1996. №7. p. 67-70. [in Russian]

13. Trifonova T.A. Problemy utilizacii TBO na poligonah [Problems of solid waste disposal at landfills] / Trifonova T.A., Selivanova N.V., Shirkin L.A. et al // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj Akademii nauk [Proceedings of the Samara scientific center of the Russian Academy of Sciences]. 2013. V.5. №3-2. p. 685-687. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.90.12.014>

**МИКРОКЛИМАТ КУЛЬТИВАЦИОННЫХ СООРУЖЕНИЙ (ТЕПЛИЦ) В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА**  
Научная статья

**Баншева Л.М.<sup>1</sup>, Львова Л.А.<sup>2</sup>\***

<sup>1,2</sup> ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова», Якутск, Россия

\* Корреспондирующий автор (lvova.lyutsiya[at]mail.ru)

**Аннотация**

В работе представлен расчет теплового баланса тепличных комбинатов в условиях Крайнего Севера и анализ вариантов тепловентиляционного оборудования. За расчётный проект принята фермерская теплица площадью 576 м<sup>2</sup>, выпускаемая ООО «Агрисовгаз». По результатам проведенной работы, оптимальным вариантом стало возведение части теплицы из бруса, а остальных ограждающих конструкций из стеклопакета. А также выполнен анализ четырёх видов систем отопления, из которых целесообразным стало применение водовоздушного отопления.

**Ключевые слова:** Культивационные сооружения, микроклимат, ограждающие конструкции, система отопления, теплота.

**MICROCLIMATE OF CULTIVATION STRUCTURES (GREENHOUSES) UNDER CONDITIONS OF FAR NORTH**

Research article

**Baisheva L.M.<sup>1</sup>, Lvova L.A.<sup>2</sup>\***

<sup>1,2</sup> Heat and Gas Supply and Ventilation, FSAEI of HE, Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

\* Corresponding author (lvova.lyutsiya[at]mail.ru)

**Abstract**

The paper presents the heat balance calculation of greenhouse plants in the Far North and the analysis of options for heat and ventilation equipment. The greenhouse farm with a total area of 576 m<sup>2</sup> manufactured by Agrisovgaz LLC is taken as the design project. According to the results of this work, the construction of part of the greenhouse from the timber, and the rest of the enclosing structures from the double-glazed window was the best option. The analysis of four types of heating systems was conducted as well; the use of water-air heating turned out to be the most appropriate.

**Keywords:** Cultivation premises, microclimate, building envelope, heating system, heat.

**Введение**

Сельскохозяйственное производство Республики Саха (Якутии) находится в зоне высокого риска в связи с экстремальными климатическими условиями. Очень короткое с неустойчивыми погодными условиями лето и длительная холодная зима создают массу проблем. Особенностью региона является резко континентальный климат, а также повсеместно распространена многолетняя мерзлота. В связи с этим требуется предпринять меры по построению культивационных сооружений круглогодичной эксплуатации.

Климат культивационных сооружений значительно зависит от наружных метеорологических условий (в особенности от интенсивности солнечной радиации, а также наружной температуры).

Теплицы – наиболее сложный и совершенный вид культивационных сооружений защищённого грунта. Они снабжены различным технологическим оборудованием, системами обеспечения микроклимата и обслуживаются людьми и машинами. Стены и кровлю теплиц делают из материалов, способных пропускать солнечную радиацию. Чаще используются стекло, стеклопластик и плёнки разных типов. Микроклимат теплиц зависит от спектральной и теплофизической характеристик материалов ограждений, степени герметизации стыков.

За расчётный проект принята фермерская теплица площадью 576 м<sup>2</sup>, выпускаемая ООО «Агрисовгаз».

**Расчёт теплового баланса**

При составлении уравнения теплового баланса используем известные в теории теплопередачи закономерности тепломассообмена, учитывая особенность условия теплиц (см. рисунок. 1).

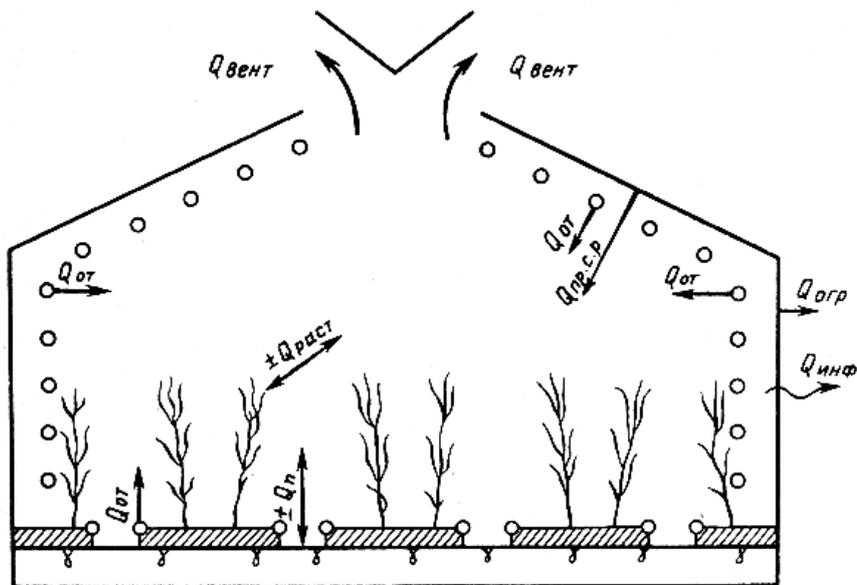


Рис. 1 – Тепловой баланс теплицы

Мощность системы отопления в теплицах определяется из уравнения теплового баланса:

$$Q_{от} = \sum Q_{огр} + Q_{гр} + Q_{инф} - Q_{почв}, Вт \quad (1)$$

Рассмотрим первый случай, когда материалом ограждающих конструкций служит стеклопакет. Потери тепла через ограждение:

$$Q_{огр} = A \kappa n (t_{вн} - t_{н}), Вт \quad (2)$$

где  $A$  – площадь ограждающих конструкций,  $м^2$ ;

$\kappa$  – коэффициент теплопередачи, для стеклопакета принимается равным  $1,67 \text{ Вт/м}^2\text{°С}$ ;

$n$  – коэффициент, учитывающий зависимость положения ограждающей конструкции по отношению к наружному воздуху, принимается равной 1.

Далее находим площадь ограждающих конструкций:

$$A = (20 \cdot 4 \cdot 2 + 3,2 \cdot 4 \cdot 2 + 1,96 \cdot 20 \cdot 2 + 1,8 \cdot 2) \cdot 9 = 2408,4 \text{ м}^2$$

Тогда

$$Q_{огр} = 2408,4 \cdot 1,67 \cdot 1 \cdot (15 + 57) = 290 \text{ кВт}$$

Рассмотрим второй случай, когда применяется монолитный поликарбонат при тройном остеклении, коэффициент теплопередачи которого равен  $1,78 \text{ Вт/м}^2\text{°С}$ .

Потери тепла через ограждение в этом случае составляет:

$$Q_{огр} = 2408,4 \cdot 1,78 \cdot 1 \cdot (15 + 57) = 309 \text{ кВт}$$

Рассмотрим третий случай, когда часть наружных стен выполнена из бруса, коэффициент теплопередачи которого равен  $0,787 \text{ Вт/м}^2\text{°С}$ , а другая часть и кровля из стеклопакета.

Площадь наружных стен:

$$A_{cm} = [(20 \cdot 4 \cdot 2 + 3,2 \cdot 4 \cdot 2) \cdot 9] \cdot 0,5 = 835,2 \text{ м}^2$$

Площадь кровли:

$$A_{кр} = (1,96 \cdot 20 \cdot 2 + 1,8 \cdot 2) \cdot 9 = 738 \text{ м}^2$$

Тогда потери тепла составляет:

$$Q_{огр} = 835,2 \cdot 0,787 \cdot 1 \cdot (15 + 57) + 1573,2 \cdot 1,67 \cdot (15 + 57) = 237 \text{ кВт}$$

Теплопотери через грунт:

$$Q_{гр} = 0,2 Q_{огр}, Вт \quad (3)$$

Первый случай:

$$Q_{cp} = 0,2 \cdot 290 = 58 \text{ кВт}$$

Второй случай:

$$Q_{cp} = 0,2 \cdot 309 = 61,8 \text{ кВт}$$

Третий случай:

$$Q_{cp} = 0,2 \cdot 237 = 47,4 \text{ кВт}$$

Количество теплоты, необходимой на нагрев инфильтрующегося воздуха:

$$Q_{инф} = 0,28V_{пом}n\rho c(t_{вн} - t_{н}), \text{Вт} \quad (4)$$

где  $V_{пом}$  - объем помещения, м<sup>3</sup>;

$n$  - кратность воздухообмена, принимается равной 1, 1/ч;

$\rho$  - плотность воздуха, 1,2 кг/м<sup>3</sup>;

$c$  - теплоемкость воздуха, равная 1 кДж/кг°С.

Объем помещения  $V_{пом} = (3,2 \cdot 20 \cdot 4 + 1,8 \cdot 1,131) \cdot 9 = 2322,3 \text{ м}^3$

Тогда количество теплоты на инфильтрацию:

$$Q_{инф} = 0,28 \cdot 2322,3 \cdot 1 \cdot 1,2 \cdot 1 \cdot (15 + 57) = 56,2 \text{ кВт}$$

Теплопоступления через почву:

$$Q_{почв} = as(t - t_{вн}), \text{Вт} \quad (5)$$

где  $a$  - коэффициент теплоотдачи поверхности почвы, 5 Вт/м<sup>2</sup>°С;

$s$  - поверхность почвы, м<sup>2</sup>, принимается равной 80 % от площади;

$t$  - температура почвы, 20 °С.

Из этого следует, что теплопоступление через почву будет равным:

$$Q_{почв} = 5 \cdot 460,8 \cdot (20 - 15) = 11,52 \text{ кВт}$$

Итак, мощность системы отопления для трех случаев, определяемы по формуле 1:

$$Q_{от} = \sum Q_{огр} + Q_{cp} + Q_{инф} - Q_{почв}, \text{Вт}$$

$$1) Q_{от} = 290 + 58 + 56,2 - 11,52 = 392,7 \text{ кВт}$$

$$2) Q_{от} = 309 + 61,8 + 56,2 - 11,52 = 415,5 \text{ кВт}$$

$$3) Q_{от} = 237 + 47,4 + 56,2 - 11,52 = 329 \text{ кВт}$$

### Анализ вариантов тепловентиляционного оборудования

В теплицах системы отопления могут быть с различными видами теплоносителя: водой, воздухом, паром, газом.

А) Наиболее популярный в настоящее время вид системы – водяное отопление. При устройстве данного отопления для обогрева отдельных зон следует установить несколько систем:

➤ Подпочвенного обогрева – для создания требуемого температурного режима в корнеобитаемом слое почвы. В качестве нагревательных элементов могут быть использованы металлопластиковые или пластмассовые трубы.

➤ Цокольного обогрева – чтобы сосредоточить холодные потоки в пристенной зоне, можно применить регистры.

➤ Шатрового обогрева – для обеспечения снеготаяния и поддержания требуемого температурного режима в верхней зоне. В качестве отопительных приборов используются излучатели.

Б) Второй способ обогрева теплиц – воздушное отопление. Воздух температурой 60-70°С подают в рабочий объем по перфорированным полиэтиленовым трубопроводам, укладываемых в надпочвенной зоне. Рассредоточенный выпуск воздуха целесообразно предусматривать также в пристенной зоне. При проектировании воздухораспределения следует отметить, что приточные струи быстро затухают, проходя через рабочий объем с большим числом листьев и плодов. Увеличить скорость струи, для того чтобы она распространялась на большие расстояния, нельзя из-за близости растений. Удаление воздуха происходит через неплотности в ограждающих конструкциях и рециркуляционные отверстия. При данном отоплении можно регулировать подвижность воздуха, уменьшать инфильтрацию, а также не допускать перегрева в летний период.

Воздушное отопление малоинерционное и требует значительно меньшего расхода металла, чем водяное. Однако таяние снега удаётся обеспечивать в редких случаях и поддерживать температуры в почве достаточно трудно. Такое отопление устаивают обычно в культивационных сооружениях небольшого объема и сезонного действия.

В) Наиболее целесообразным является применение комбинированного водовоздушного обогрева. Системы подпочвенного и шатрового отопления должны быть водяными. Под лотки и пристенную зону следует подавать нагретый воздух. Данная система совмещает в себе преимущества водяной и воздушной. Она надёжно и равномерно обеспечивает требуемые параметры воздуха и почвы, исключает перегрев в летний период, уменьшает инфильтрацию

и создаёт необходимую подвижность воздуха. Комбинируя режимы работы водяной и воздушной систем, можно регулировать температуру воздуха в теплице в зависимости от наружных условий.

В зависимости от наружных параметров воздуха можно регулировать температуру воздуха внутри теплицы, комбинируя режимы работы водяной и воздушной систем. Наиболее сложной задачей является размещение установок водовоздушного обогрева.

Г) В последнее время получило распространение электрическое отопление. В этом случае предлагается солнечный электрогенератор.

Из-за высокой теплоизоляции вакуумные солнечные коллекторы эффективно работают при низких температурах окружающей среды вплоть до  $-30^{\circ}\text{C}$ , что очень полезно для обогрева теплиц и грунта.

Однако, когда температура окружающей среды и плотность потока солнечного излучения низкие, коллекторы не способны обеспечить требуемые параметры воздуха, тогда подключается тепловой насос. Союз комбинированных систем, является конкурентным по сравнению с традиционными системами отопления. Из-за снижения стоимости устройств данный путь отопления становится весьма привлекательным. Солнечная энергия бесплатна, экологична и способна покрывать значительную долю тепловой потребности теплицы.

### Выводы

Исходя из вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Выполнен расчёт мощности системы отопления фермерской теплицы площадью  $576 \text{ м}^2$ , в первом случае, когда ограждающие конструкции выполнены из стеклопакета, во втором – из монолитного поликарбоната при тройном остеклении, и в третьем – из бруса и стеклопакета. Как следует из этих расчётов для ограждающих конструкций, выполненных из стеклопакета, на  $1 \text{ м}^2$  необходимое количество теплоты составило  $0,68 \text{ кВт}$ ; из поликарбоната –  $0,72 \text{ кВт}$ ; из бруса и стеклопакета –  $0,57 \text{ кВт}$ . Таким образом, наиболее целесообразно будет возвести теплицу, ограждающие конструкции которого будут выполнены частично из бруса, частично из стеклопакета.

2. Выполнен сравнительный анализ четырёх видов систем отопления, исходя из которых обосновано оборудование. На основе вышеуказанных достоинств, логично было применить водовоздушную систему отопления, т.к. она надёжно и равномерно обеспечивает требуемые параметры воздуха и почвы, исключает перегрев в летний период, уменьшает инфильтрацию и создаёт необходимую подвижность воздуха. В качестве отопительных приборов применены регистры и перфорированные воздухопроводы.

При условии наличия источника теплоснабжения, котельной с расчётной нагрузкой, требуемой для поддержания микроклимата теплицы, будет возможно ее построение круглогодичной эксплуатации в условиях Крайнего Севера.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Conflict of Interest

None declared.

### Список литературы / References

1. СНиП 2.10.04-85. Теплицы и парники
2. НТП 10-95. Нормы технологического проектирования теплиц и тепличных комбинатов для выращивания овощей и рассады
3. Бодров В. И. Микроклимат зданий и сооружений / Бодров В. И. – Нижний Новгород: Арабеск, 2001. – 395 с.
4. Егиазаров А. Г. Отопление и вентиляция зданий и сооружений сельскохозяйственных комплексов / Егиазаров А. Г. – М.: Стройиздат, 1981.
5. Климов В. В. Оборудование теплиц подсобных и личных хозяйств / Климов В. В. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 96 с.
6. Степанова А. Е. Сельскохозяйственное производство на примере республики Саха (Якутия) на современном этапе / Степанова А. Е. // Региональная экономика: теория и практика. – 2011. – 23. – С. 59-62.
7. Малышев Н. А. Исследование температурного и тепловлажностного режима культивационных сооружений в теплый период года / Малышев Н.А., Логинов И.А. // Приволжский научный журнал. – 2010. – 4 (16). – С. 106-113.
8. Борисов Е. А. Система управления агропромышленным комплексом Республики Саха (Якутия): дис. ... канд. тех. наук: 08.00.05: защищена 03.10.00: утв. 15.07.05 / Борисов Егор Афанасьевич. – М.: ВНИИЭСХ, 2000. – 348 с.
9. Бирюков С. В. Особенности нормирования потребления тепловой энергии системами отопления и вентиляции сельскохозяйственными зданиями / Бирюков С. В. // Аграрный научный журнал. – 2019. – 9. – С. 74-78.
10. Молчанов А.Г. Оптимизация параметров микроклимата теплиц / Молчанов А.Г., Авдеева В.Н. // Техника и оборудование для села. – 2009. – 9. – С. 39-40.

### Список литературы на английском языке / References in English

1. SNiP 2.10.04-85. Teplitsy i parniki [Greenhouses and hotbeds] [in Russian]
2. NTP 10-95. Normy tekhnologicheskogo proyektirovaniya teplits i teplichnykh kombinatov dlya vyrashchivaniya ovoshchey i rassady [Norms of technological design of greenhouses and greenhouse complexes for growing vegetables and seedlings] [in Russian]
3. Bodrov V.I. Mikroklimat zdaniy i sooruzheniy [Microclimate of buildings and structures] / Bodrov V.I. – Nizhny Novgorod: Arabesque, 2001. – 395 p. [in Russian]
4. Egiazarov A. G. Otopleniye i ventilyatsiya zdaniy i sooruzheniy sel'skokhozyaystvennykh kompleksov [Heating and ventilation of buildings and structures of agricultural complexes] / Egiazarov A. G. – M.: Stroyizdat, 1981. [in Russian]
5. Klimov. V.V. Oborudovaniye teplits podsobnykh i lichnykh khozyaystv [Equipment of greenhouses for subsidiary and personal households] / Klimov. V.V. – M.: Energoatomizdat, 1992. – 96 p. [in Russian]
6. Stepanova A.E. Sel'skokhozyaystvennoye proizvodstvo na primere respublik Sakha (Yakutiya) na sovremennom etape [Agricultural production on example of Republic of Sakha (Yakutia) at present stage] / Stepanova A.E. // Regional'naya ekonomika: teoriya i praktika. [Regional economy: theory and practice]. – 2011. – 23. – P. 59-62. [in Russian]

7. Malyshev N. A. Issledovaniye temperaturnogo i teplovlazhnostnogo rezhima kul'tivatsionnykh sooruzheniy v teplyy period goda [Research of temperature heat and humidity conditions of cultivation facilities in warm season] / Malyshev N. A., Loginov I. A. // Privolzhskiy nauchnyy zhurnal [Volga Scientific Journal]. – 2010. – 4 (16). – P. 106-113. [in Russian]
8. Borisov E. A. Sistema upravleniya agropromyshlennym kompleksom Respubliki Sakha (Yakutiya) [Management system of the agro-industrial complex of Republic of Sakha (Yakutia)] PhD thesis in Engineering] 08.00.05: protected 03.10.00: approved. 07/15/05 / Borisov Egor Afanasevich. – M: VNIIESKh, 2000. – 348 p. [in Russian]
9. Biryukov S.V. Osobennosti normirovaniya potrebleniya teplovoy energii sistemami otopleniya i ventilyatsii sel'skokhozyaystvennyimi zdaniyami [Features of thermal energy consumption regulation by heating and ventilation systems in agricultural buildings] / Biryukov S.V. // Agrarnyy nauchnyy zhurnal [Agrarian scientific journal]. – 2019. – 9. – P. 74-78. [in Russian]
10. Molchanov A.G. Optimizatsiya parametrov mikroklimate teplits [Optimization of microclimate parameters of greenhouses] / Molchanov A.G., Avdeeva V.N. // Tekhnika i oborudovaniye dlya sela [Technique and equipment for the village]. – 2009. – 9. – P. 39-40. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.90.12.015>

## АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ГРУЗОВОГО ТРАНСПОРТА В МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕГО МОДЕРНИЗАЦИИ

Обзор

**Миличенкова Ю.В. \***

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия

\* Корреспондирующий автор (ylia-mili[at]mail.ru)

### Аннотация

Целью данной работы является установление параметров, влияющих на стратегию модернизации подвижного состава, на основе анализа состояния грузового транспорта в Московской области. Для достижения поставленной цели, были определены следующие задачи: изучить статистику по Российской Федерации о среднем возрасте парка грузовых транспортных средств и используемых видов автотранспорта, провести анализ интервью руководителя Департамента транспорта и развития дорожно-транспортной инфраструктуры города Москвы. На основе собранной информации сделать вывод о возможности модернизации транспортных средств, ее сроках и перспективах развития.

**Ключевые слова:** грузовой транспорт, грузовые перевозки, подвижной состав, транспортная логистика, модернизация подвижного состава.

## ANALYSIS OF CARGO TRANSPORT STATE IN MOSCOW REGION AND PROSPECTS OF ITS MODERNIZATION

Review

**Milichenkova Yu.V. \***

Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia

\* Corresponding author (ylia-mili[at]mail.ru)

### Abstract

The primary goal of this work is to define the parameters affecting the truck fleet modernization strategy, based on the analysis of the state of freight transport in the Moscow region. The following tasks were identified to achieve this goal: to study statistics on the average age of the truck fleet and types of vehicles used in the Russian Federation, to analyze the interview of the head of the Department of Transport and the Development of Road Transport Infrastructure of Moscow. Based on the information collected, the author draws a conclusion about the possibility of modernizing vehicles, its timing and development prospects.

**Keywords:** freight transport, cargo carrying, rolling stock, transport logistics, truck fleet modernization.

### Введение

Самыми востребованными перевозками являются перевозки грузов автомобильным транспортом. Состояние эксплуатируемых транспортных средств в Российской Федерации достаточно печальное. Отмена лицензирования любых перевозок грузов на автотранспорте привела к ухудшению технического состояния транспортных средств, поэтому, необходимо проводить обновление подвижного состава. В данной статье будет проведен анализ состояния грузового транспорта в Московской области, рассмотрены параметры, от которых зависит скорость его модернизации, а также такие вспомогательные параметры транспортного комплекса как автомобильные дороги, транспортно-логистические комплексы, система взимания платы за пользование автодорогами федерального значения «Платон».

### Основная часть

Без грузовых автомобилей невозможно представить жизнь человека: перевозка товаров из магазина и агрокомплексов, строительная индустрия, малый и средней бизнес. Большинство предприятий не имеет иных подъездных путей, кроме как автомобильных.

Одним из наиболее популярных и выгодных способов доставки грузов – перевозка в смешанном сообщении, которая не обходится без автомобильного транспорта, который, в свою очередь, обеспечивает своевременный завоз и вывоз грузов из терминалов. По данным Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030г., к 2030 году грузооборот автотранспорта общего пользования вырастет до 140 млрд т-км (в 2015 году данный показатель составлял 95 млрд т-км).

Структура парка транспортных средств неоднородна: около 25% - бортовые АТС, 75% - специализированные транспортные средства (в том числе самосвалы, цистерны, рефрижераторы, транспортные средства с другими типами кузова). На рисунке 1 отражена доля грузовых автомобильных транспортных средств по грузоподъемности. Видно, что наибольшую долю составляют АТС с грузоподъемностью до 1,5 т включительно. Такие автомобили используются при внутригородских перевозках. Например, для того чтобы доставить небольшую партию груза от терминала, который находится в Московской области, до грузополучателя в Москве, используются небольшие грузовые АТС с грузоподъемностью до 1,5т. Использование небольших грузовых автомобилей при перевозках внутри города выгодно, так как, например, для въезда в Москву АТС с намного большей грузоподъемностью требуется получения специального разрешения, а также на территории города действуют ограничения для такого транспорта.

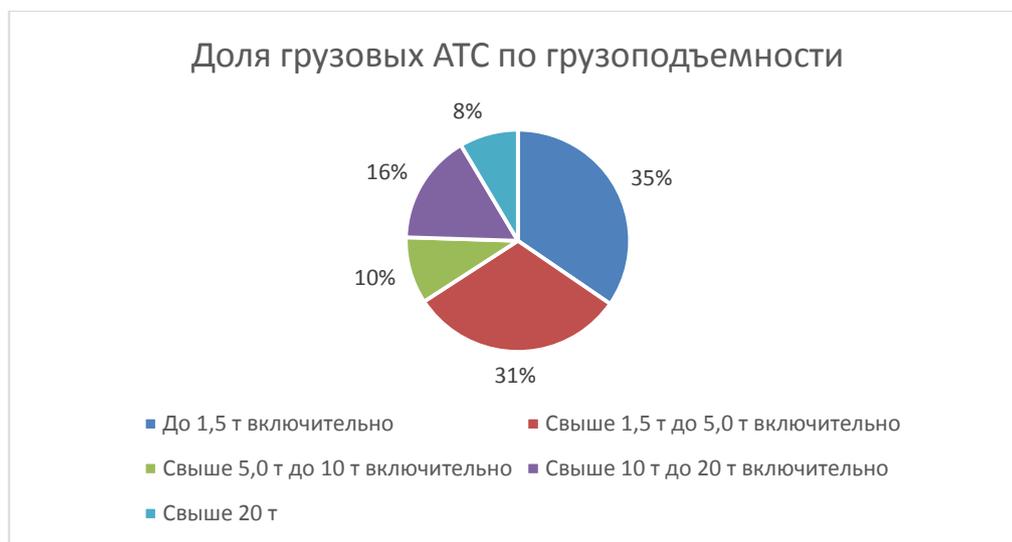


Рис. 1 – Доля грузовых автотранспортных средств по грузоподъемности

Доля автомобильного транспорта, в частности грузового, зависит от количества и качества автомобильных дорог в регионе. На территории Московской области проходят 11 главных международных направлений и 13 крупнейших автомагистралей, а также расположены 8 аэропортов, три из которых международного значения, более 250 терминальных комплексов. Согласно данным Федеральной службы государственной статистики, в Московской области, доля автомобильных дорог общего пользования регионального или муниципального значения, отвечающих нормативным требованиям, увеличивается (рис. 2). Для компенсации вреда, причиняемого дорогам федерального значения большегрузными транспортными средствами (разрешенная максимальная масса которых больше 12 тонн), была введена в 2015 году система «Платон». Наличие установленной системы проверяется путем проезда фур через стационарные рамки либо путем мобильного контроля через специально оборудованные автомобили.

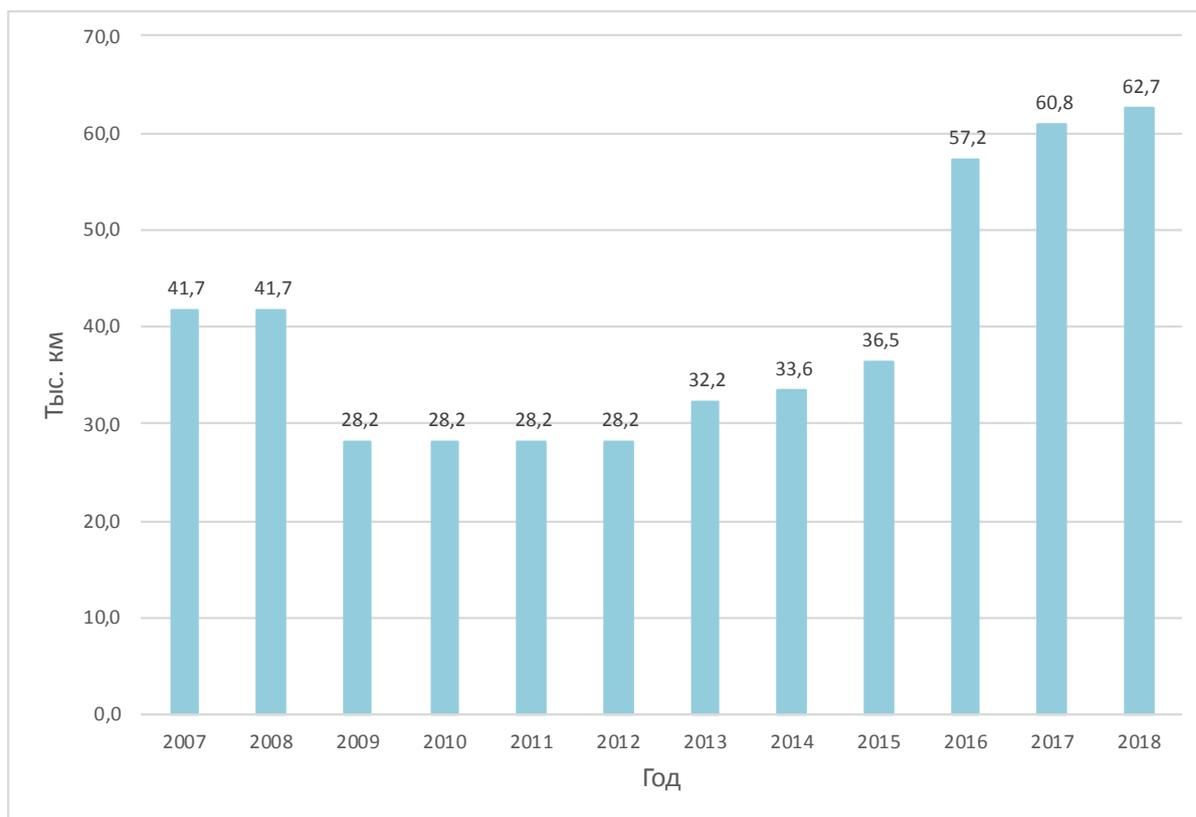


Рис. 2 – Диаграмма доли автомобильных дорог в Московской области, отвечающих нормативным требованиям

Движение большегрузных автомобилей по Московской области нередко проходило транзитом через МКАД. Грузовые транспортные средства создавали большую нагрузку на улично-дорожную сеть, что приводило к нарушению функционирования автомобильной дороги, и, как следствие, возникали заторы. В интервью руководителя транспортного комплекса Москвы Максима Ликсутова «РИА Новостям», согласно статистике на 10 октября 2019 года, ежедневно на МКАД стало выезжать на 5% грузовых транспортных средств меньше. Это связано с тем, что в московском регионе проводится эффективная политика по регулированию движения грузового транспорта, а также непосредственное внедрение современной системы комплексов фотовидеофиксации, которые следят за движением грузовых автомобилей без пропусков. Еще одна проблема, связанная с грузовыми транспортными средствами, - их

движение по вылетным и крупным магистралям. Также, в интервью было сказано о том, что «существенная часть грузовиков ездит не по оптимальным логистическим схемам». Введение ЦКАД должно разгрузить московскую кольцевую автодорогу и позволить сократить «сквозной» транзит большегрузных фур. Согласно данным доклада о реализации транспортной стратегии на период до 2030 года от 11 июля 2019 года, процент технической готовности реконструкции и строительства автомобильных дорог в Московской области составляет более 70%, а готовность транспортной инфраструктуры для формирования комплексной транспортно-логистической системы г. Москвы и Московской области, в том числе создание Дмитровского межрегионального мультимодального логистического центра составляет 2,8%.

Обновление парка подвижного состава – первоочередная задача. Средний возраст парка 19,3 года, доля грузовых автомобилей старше 15 лет – 60%. Отмена в 2005 году лицензирования всех видов грузовых перевозок привела к ряду проблем. Например, грузовые АТС, которые не соответствуют современным экологическим требованиям, более 80%.

Одной из главных направляющих в модернизации подвижного состава является конкуренция, которая заключается в выводе на рынок обновленных, усовершенствованных и качественных транспортных средств, грамотном техническом обслуживании, а также доступной ценовой политикой как для малого, среднего бизнеса, так и для больших компаний. Лидирующим отечественных производителей является ПАО «КАМАЗ». Самыми важными задачами стратегического развития компании до 2025 года являются увеличение доли данной марки на рынке грузовых автомобилей до 65-80 тысяч единиц и введение стандарта ЕВРО-6. Также, немало важной составляющей модернизации подвижного состава, является обслуживание транспортных средств после их вывода в эксплуатацию.

Для более детального и полного анализа парка транспортных средств необходимо рассматривать конкретно каждое автотранспортное предприятие. Основными задачами будут следующее:

- Определение внешних и внутренних факторов, влияющих на развитие автотранспортного комплекса и его систем;
- Определение основных требований к характеристикам уровня качества парка грузовых транспортных средств;
- Разработка прогнозных моделей развития параметров грузовых АТС;
- Оценка имеющегося на предприятии подвижного состава и расчет последующих инвестиций в его модернизацию.

Проведя анализ состояния грузового транспорта в Московской области, были выделены следующие основные параметры, влияющих на стратегию модернизации подвижного состава: принятие новых мер в области обеспечения активной, пассивной, послеаварийной и экологической безопасности транспортных средств; ограничения движения грузового транспорта в Москве; увеличение грузооборота, в связи со строительством современных крупных транспортно-логистических центров в Московской области и новых автодорог, а также конкуренция производителей транспортных средств. Каждый из параметров влияет на срок модернизации подвижного состава. Так, принятие мер в области безопасности ускоряет процесс модернизации транспортных средств, так как данные меры являются основополагающими в транспортном процессе. Момент от принятия таких мер до вступления в силу может занимать около полугода – года, поэтому у перевозчиков есть ограниченное время на усовершенствование транспортных средств до момента вступления в силу данных мер. Строительство транспортно-логистических центров, наоборот, замедляет процесс модернизации, так как срок, от момента планирования ТЛЦ до ввода объекта в эксплуатацию, достаточно большой и может занимать несколько лет. Ввод ограничений въезда большегрузного транспорта в город заставляет перевозчиков ускорить процесс по обновлению парка транспортных средств, так как в городе находится большое количество грузополучателей, которым необходимо доставить груз точно в срок, поэтому правильно подобранный подвижной состав для перевозок в городе особенно важен. Конкуренция производителей заключается в производстве современных транспортных средств, которые отвечают всем требованиям; а также предоставление специальных программ по обслуживанию и ремонту подвижного состава для перевозчиков.

Рассмотрев все параметры влияния на модернизацию подвижного состава, можно сказать, что ее сроки будут ограничены принятием мер по безопасности, по ограничениям на движение, по экологическим требованиям, строительству крупных транспортно-логистических центров, строительству дорог. Перспектива модернизации долгосрочная, не каждый перевозчик сможет обновить свой подвижной состав в короткие сроки. Согласно Транспортной стратегии Российской Федерации, обновление парка грузовых транспортных средств будет длиться до 2030 года. Перспектива модернизации подвижного состава заключается в соответствии его нормативным, экологическим, техническим требованиям. Такой подвижной состав будет оснащен современным оборудованием, отвечающим за безопасность транспортного средства, водителя и перевозимого груза, будут снижены выбросы выхлопных газов.

#### **Заключение**

В данной работе были рассмотрены параметры, влияющие на модернизацию подвижного состава и ее сроки, а также был проведен анализ состояния грузового транспорта в Московской области. Анализ заключался в рассмотрении состава парка транспортных средств как по типу кузова, так и по грузоподъемности; была составлена диаграмма дорог Московской области, отвечающих нормативным требованиям и проанализировано интервью Ликсутова, касающееся ввода в эксплуатацию ЦКАД. Также, был рассмотрен более подробно один из основных параметров, влияющий на перспективу модернизации, - конкуренция, на примере отечественного производителя грузовых транспортных средств ПАО «КАМАЗ». Таким образом, цель данной работы была достигнута, путем рассмотрения задач модернизации грузового транспорта в Московской области на ближайшее будущее.

#### **Конфликт интересов**

Не указан.

#### **Conflict of Interest**

None declared.

**Список литературы / References**

1. Титов И.В. Грузовой автомобильный транспорт в России: состояние и перспективы развития / Титов И.В., Батищев И.И. // Транспорт Российской Федерации. 2011.
2. Блудян Н.О. Региональные проблемы функционирования грузового транспорта / Блудян Н.О. // Сборник научных трудов. Организация перевозок пассажиров и грузов на современном этапе. М.: МАДИ (ГТУ), 2007. С. 16-24.
3. Блудян Н.О. Актуальные проблемы государственного регулирования транспортного обслуживания населения в Московской области / Блудян Н.О. // Сборник научных трудов. Организация перевозок пассажиров и грузов на современном этапе. М.: МАДИ (ГТУ), 2007. С. 5-15
4. Ипатов А.А. Формирование эксплуатационно-экономических требований к перспективным моделям грузовых автомобилей: автореф. дис. ... д-р. экон. наук: 08.00.05 / Ипатов А.А. М., 2003.
5. Постановление Правительства "Постановление Правительства РФ от 15.04.2011 N 272 (ред. от 12.12.2017, с изм. от 22.12.2018) "Об утверждении Правил перевозок грузов автомобильным транспортом"// Собрание актов Президента и Правительства Российской Федерации.
6. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года Министерство транспорта Российской Федерации [Электронный ресурс] – URL: <https://www.mintrans.ru/ministry/targets/187/191/documents> (дата обращения: 10.10.2019).
7. Транспорт в России // Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс] – URL: [https://www.gks.ru/storage/mediabank/transp18\(1\).pdf](https://www.gks.ru/storage/mediabank/transp18(1).pdf) (дата обращения: 10.10.2019).
8. Снижение интенсивности движения большегрузов на МКАД РИА Новости [Электронный ресурс] – URL: <https://ria.ru/20191010/1559608182.html> (дата обращения: 16.10.2019).
9. Программа стратегического развития ПАО «КАМАЗ» на период до 2025 года ПАО "КАМАЗ" [Электронный ресурс] – URL: [https://kamaz.ru/upload/import\\_texts/KAMAZ%20Strategy%202025\\_Public\\_rus.pdf](https://kamaz.ru/upload/import_texts/KAMAZ%20Strategy%202025_Public_rus.pdf) (дата обращения: 10.10.2019).
10. Система взимания платы "Платон" [Электронный ресурс] – URL: <http://platon.ru/ru/> (дата обращения: 11.10.2019).

**Список литературы на английском языке / References in English**

1. Titov I.V. Gruzovoy avtomobil'nyy transport v Rossii: sostoyaniye i perspektivy razvitiya [Freight automobile transport in Russia: state and development prospects] / Titov I.V., Batishchev I.I. // Transport Rossiyskoy Federatsii [Transport of the Russian Federation]. 2011. [in Russian]
2. Bludyan N.O. Regional'nyye problemy funktsionirovaniya gruzovogo transporta Sbornik nauchnykh trudov. Organizatsiya perevozk passazhirov i gruzov na sovremennom etape [Regional problems of freight transport functioning] / Bludyan N.O. // [Collection of scientific papers. Organization of transportation of passengers and goods at the present stage]. М.: – МАДИ (GTU), – 2007. – P. 16-24. [in Russian]
3. Bludyan N.O. Aktual'nyye problemy gosudarstvennogo regulirovaniya transportnogo obsluzhivaniya naseleniya v Moskovskoy oblasti [Actual problems of state regulation of transport services in the Moscow region] / Bludyan N.O. // Sbornik nauchnykh trudov. Organizatsiya perevozk passazhirov i gruzov na sovremennom etape [Collection of scientific papers. Organization of transportation of passengers and goods at the present stage]. – М.: МАДИ (GTU), – 2007. – P. 5-15 [in Russian]
4. Ipatov A.A. Formirovaniye ekspluatatsionno-ekonomicheskikh trebovaniy k perspektivnym modelyam gruzovykh avtomobiley [Formation of operational and economic requirements for promising truck models]: Abstract of PhD thesis in Economics: 08.00.05. / Ipatov A.A. М., 2003. [in Russian]
5. Government Decree "Decree of the Government of the Russian Federation of April 15, 2011 N 272 (as amended on 12/12/2017, as amended on 12/22/2018) Ob utverzhdenii Pravil perevozk gruzov avtomobil'nyim transportom [On approval of the Rules for the carriage of goods by road] // Sobraniye aktov Prezidenta i Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii [Collection of Acts of the President and Government of the Russian Federation]. [in Russian]
6. Transportnaya strategiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda [Transport strategy of the Russian Federation for the period until 2030] Ministerstvo transporta Rossiyskoy Federatsii [Ministry of Transport of the Russian Federation] [Electronic resource] – URL: <https://www.mintrans.ru/ministry/targets/187/191/documents> (accessed: 10.10.2019). [in Russian]
7. Transport v Rossii [Transport in Russia] Federal'naya sluzhba gosudarstvennoy statistiki [Federal State Statistics Service] [Electronic resource] – URL: [https://www.gks.ru/storage/mediabank/transp18\(1\).pdf](https://www.gks.ru/storage/mediabank/transp18(1).pdf) (accessed: 10.10.2019). [in Russian]
8. Snizheniye intensivnosti dvizheniya bol'shegruzov na MKAD [Decrease in heavy traffic on Moscow Ring Road] // РИА Новости [Electronic resource] – URL: <https://ria.ru/20191010/1559608182.html> (accessed: 10.16.2019). [in Russian]
9. Programma strategicheskogo razvitiya PAO «КАМАЗ» na period do 2025 goda [Strategic development program of PJSC KAMAZ for the period until 2025] // PJSC KAMAZ [Electronic resource] – URL: [https://kamaz.ru/upload/import\\_texts/KAMAZ%20Strategy%202025\\_Public\\_rus.pdf](https://kamaz.ru/upload/import_texts/KAMAZ%20Strategy%202025_Public_rus.pdf) (accessed: 10.10.2019). [in Russian]
10. Sistema vzimaniya platy "Platon" ["Platon" payment system] [Electronic resource] – URL: <http://platon.ru/ru/> (accessed: 11.10.2019).

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.90.12.016>

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ПЕРВОГО ПОДЪЕМА НА ПРИМЕРЕ СИСТЕМЫ ВОДОСНАБЖЕНИЯ ПГТ. НОВООРЛОВСК ЗАБАЙКАЛЬСКОГО КРАЯ

Научная статья

Палкин Г.А.<sup>1, \*</sup>, Суворов И.Ф.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-9025-2524;

<sup>1, 2</sup> ФГБОУ ВО Забайкальский государственный университет, Чита, Россия

\* Корреспондирующий автор (pala88[at]yandex.ru)

### Аннотация

В данной работе приводится краткое описание проекта по разработке аппаратно-программного комплекса управления насосными агрегатами первого подъема системы водоснабжения пгт. Новоорловск Забайкальского края. Целью работы является повышение экономической эффективности процесса наполнения водой накапливающего резервуара первого подъема. Кроме того комплекс должен обеспечивать высокую надежность функционирования участка первого подъема путем предотвращения замерзания трубопровода. Производится анализ технической и экономической эффективности предложенных решений.

**Ключевые слова:** водоснабжение, автоматическое управление, уровень, температура.

## AUTOMATION OF FIRST LIFT ON THE EXAMPLE OF WATER SUPPLY SYSTEM IN NOVOORLOVSK VILLAGE OF ZABAYKALSKY KRAI

Research article

Palkin G.A.<sup>1, \*</sup>, Suvorov I.F.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-9025-2524;

<sup>1, 2</sup> FSEI HE Transbaikal state university, Chita, Russia

\* Corresponding author (pala88[at]yandex.ru)

### Abstract

This work presents a brief description of the project on the development of a hardware-software complex for controlling pumping units of the first lift of a water supply system in Novoorlovsk village of Zabaykalsky Krai. The goal of the work is to increase the economic efficiency of the accumulating reservoir water filling process in the first lift. Besides, the complex should provide high reliability of the operation of the first lift by preventing freezing of the pipeline. The paper presents the analysis of the technical and economic efficiency of the proposed solutions.

**Keywords:** water supply, automatic control, level, temperature.

### Введение

Организация водоснабжения является важной составляющей нормального существования любого населенного пункта или промышленного предприятия.

Соответственно, процесс водоснабжения нормируется государственными стандартами, требующими выполнения ряда требований [1].

В системе водоснабжения пгт. Новоорловск Забайкальского края используется схема с накапливающим резервуаром. В подобных системах участок между скважиной и накапливающим резервуаром называется участком первого подъема. Преимуществом данной схемы является возможность аккумуляции и резервирования воды, выкачиваемой из скважин, для бесперебойного снабжения конечного потребителя. Подобные схемы системы водоснабжения широко распространены на территории Забайкальского края и Российской Федерации.

Основным недостатком схемы с накапливающим резервуаром является перелив воды из резервуара. Перелив возникает, когда скважинные насосные агрегаты первого подъема перекачивают в резервуар больше жидкости, чем необходимо конечному потребителю, а излишки воды сбрасываются в окружающую среду. При переливе происходит неоправданная растрата природных и производственных ресурсов. Только затраты электроэнергии на перелив в системе водоснабжения пгт. Новоорловск достигают до 30% от общей величины электропотребления.

Исходя из вышесказанного, актуальной задачей для обеспечения экономической эффективности системы водоснабжения пгт. Новоорловск является разработка комплекса автоматического управления, позволяющего минимизировать перелив воды и обеспечить достаточную надежность функционирования участка первого подъема.

### Анализ предметной области

Для решения проблемы перелива воды из накапливающего резервуара необходимо плавно изменять производительность работы насосного агрегата первого подъема в зависимости от нужд конечного потребителя (уровня воды в накапливающем резервуаре), что, в свою очередь, будет изменять объемный расход жидкости в трубопроводе. При регулировании величины расхода жидкости будет изменяться и её температура, поскольку параметры теплопереноса напрямую зависят от величины объемного расхода воды в трубопроводе [2, С. 50-51].

Таким образом, изменение расхода жидкости, перекачиваемой в резервуар, увеличивает вероятность замерзания трубопровода, что необходимо учитывать в алгоритме управления комплексом. Ситуация осложняется тем, что в системе водоснабжения пгт. Новоорловск трубопровод заглубляется в грунт на уровень, недостаточный для предотвращения замерзания воды, а методы активной защиты (греющий кабель, предварительный водоподогрев) не используются ввиду низкой рентабельности [3, С. 78-79]. В данной ситуации для предотвращения замерзания

водоводов используется способ подачи по трубопроводу максимального расхода воды. Данный способ приводит к постоянному максимальному переливу.

Соответственно, для обеспечения экономически эффективного наполнения накапливающего резервуара водой необходимо на участке первого подъема поддерживать расход жидкости, достаточный для удовлетворения нужд конечного потребителя, и обеспечивающий защиту трубопровода от замерзания при минимальном переливе [4, С. 59-60].

Для достижения поставленной цели необходимо разработать алгоритм вычисления оптимальной величины расхода жидкости и аппаратную часть комплекса для его реализации. Дополнительно комплекс должен осуществлять диагностику технического состояния насосов, с целью расчета их ресурса и автоматического ввода резерва, в случае угрозы возникновения аварийной ситуации [5].

**Методы реализации поставленных задач**

Схема участка первого подъема системы водоснабжения пгт. Новоорловск имеет вид, представленный на рисунке 1.

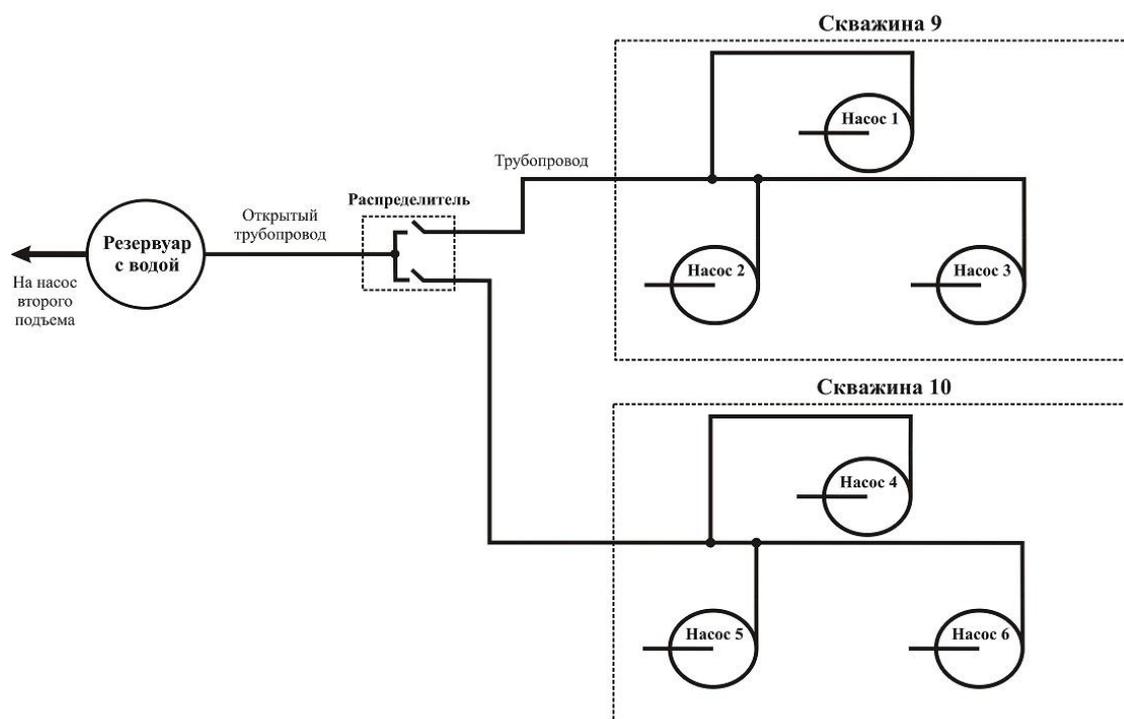


Рис. 1 – Схема системы водоснабжения

В соответствии с техническим заданием необходимо было автоматизировать 10-ю скважину, которая имеет три насосных агрегата (1 основной, 1 резервный, 1 запасной) ЭЦВ10-65/100 мощностью 32 кВт каждый. Основной и резервный насос подключаются к распределительному узлу трубопроводом с диаметром условного прохода 150 мм. Далее вода транспортируется по сдвоенному трубопроводу с диаметром условного прохода 274 мм протяженностью 9 км и заглубленному в грунт примерно на 2 м в сдвоенный накапливающий резервуар.

Для реализации основных функциональных возможностей комплекса управления была разработана структурная схема его аппаратной части [6, С. 55-60], которая была адаптирована для автоматизации участка первого подъема системы водоснабжения пгт. Новоорловск в соответствии с рисунком 2.

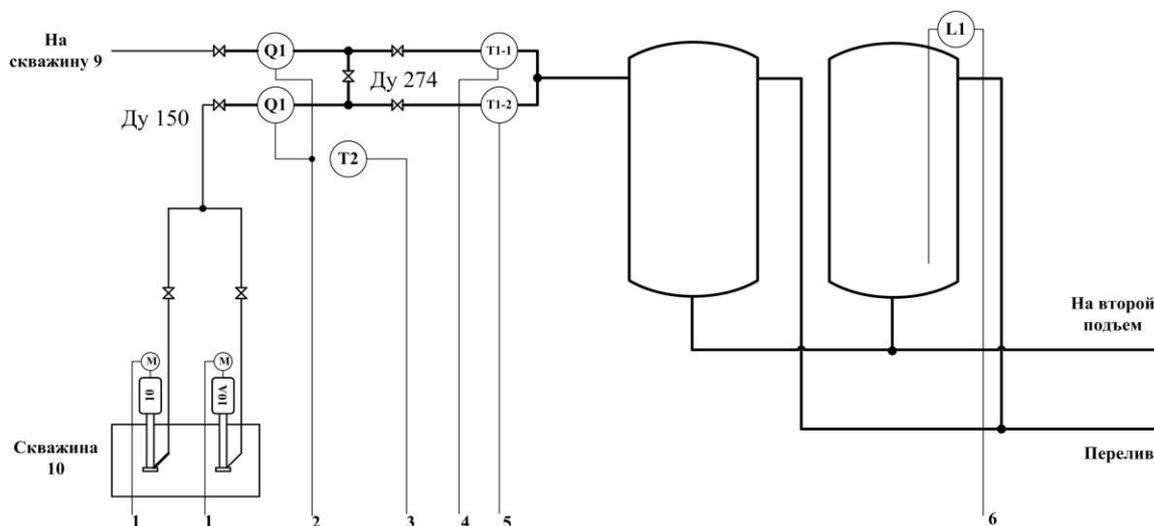


Рис. 2 – Схема автоматизации участка первого подъема

На схеме Q1 – электромагнитный расходомер, L1 – ультразвуковой уровнемер, T2 – датчик температуры окружающего воздуха, T1-1 и T1-2 –врезные датчики температуры воды в трубопроводе, М – электродвигатели скважинных насосов.

На рисунке 3 приводятся и функциональные требования к комплексу управления данным объектом.

В соответствии с поставленными требованиями процесс автоматизации участка первого подъема заключается в управлении производительностью основного насосного агрегата при помощи частотного преобразователя (ЧП). Необходимо, чтобы индикация параметров и управление частотным преобразователем осуществлялось на месте (щит ЧП), на контроллере (устройстве управления) и дистанционно через АРМ (автоматизированное рабочее место - персональный компьютер).

Также необходимо предусмотреть возможность ручного и автоматизированного выбора основного насосного агрегата и возможность ручного запуска и остановки основного насосного агрегата.

		1	2	3	4	5	6	
Параметр Тип прибора		Производительность (0...65 м <sup>3</sup> /ч) Насос ЭЦВ10-65/100	Расход (5...65 м <sup>3</sup> /ч) Электромагнитный расходомер Q1	Температура окр. среды (-40...+60 °С) Датчик температуры T2	Температура жидкости (0...+80 °С) Врезной датчик температуры T1-1	Температура жидкости (0...+80 °С) Врезной датчик температуры T1-2	Уровень (0,3...5 м) Ультразвуковой уровнемер L1	
Контроль на месте							●	
Местные управление	Приборы на щите (устройстве)	Показания	●					
		Регистрация						
		Сигнализация	●					
		Управление	●					
	Контроллер	Показания	●	●	●	●	●	●
		Регистрация	●	●	●	●	●	●
		Сигнализация	●	●	●	●	●	●
		Управление	●					
		Автоматическое управление	●	●	●	●	●	●
	Удаленное АРМ оператора	Показания	●	●	●	●	●	●
Регистрация		●	●	●	●	●	●	
Сигнализация		●	●	●	●	●	●	
Управление		●						

Рис. 3 – Функциональные требования

Автоматическое управление производительностью насосного агрегата должно осуществляться в зависимости от параметров расхода, получаемых от устройства управления и показаний расходомера, установленного на трубопроводе перед распределительным узлом. Расход рассчитывается специальным программным алгоритмом [7], на основании данных получаемых от датчиков температуры воды в конце сдвоенного трубопровода и уровня в накапливающем резервуаре. Информацию со всех датчиков отображается на устройстве управления и АРМ оператора.

**Анализ эффективности предложенных решений**

Для оценки эффективности предложенных решений выполнялись расчеты температуры жидкости в конечной части трубопровода (как наиболее невыгодной точке трубопровода) [2, С. 50], [8], [9].

Для упрощения процесса расчета применялась специальная авторская программа оценки тепловых параметров трубопровода [10, С. 271-274].

При помощи данной программы был произведен расчет трубопровода первого подъема автоматизированной системы водоснабжения. В результате были получены зависимости температуры от расхода, представленные на рисунке 4.

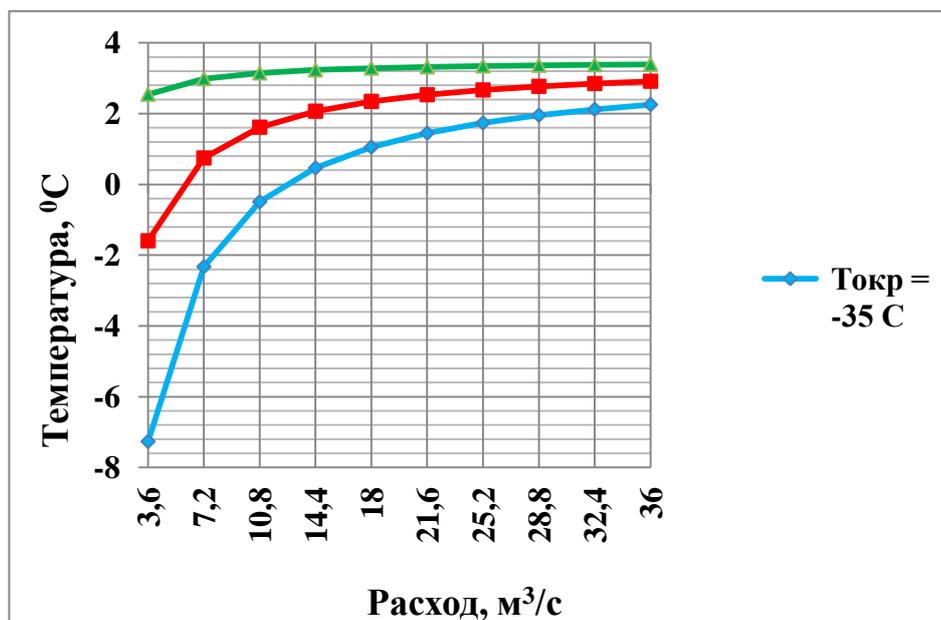


Рис. 4 – Зависимость температуры воды от расхода

Анализируя рисунок 4, можно сделать вывод, что графически зависимость температуры жидкости в конечной части трубопровода от расхода является криволинейной и напоминает логарифмическую. При температуре окружающей среды  $0^{\circ}\text{C}$  на заданных характеристиках системы замерзание маловероятно и может произойти только на сверхмалых расходах. При температуре окружающей среды  $-15^{\circ}\text{C}$  замерзание произойдет при расходе  $5\text{ м}^3/\text{ч}$  в одном трубопроводе и общем расходе  $10\text{ м}^3/\text{ч}$  соответственно. При температуре  $-35^{\circ}\text{C}$  замерзание произойдет при расходе  $12\text{ м}^3/\text{ч}$  в одном трубопроводе и общем расходе  $24\text{ м}^3/\text{ч}$ . Таким образом можно сделать вывод, что снижение расхода ниже данных величин недопустимо. А на более высоких значениях расхода выбранный способ управления обеспечивает защиту трубопровода от замерзания и минимизацию перелива воды из накапливающего резервуара. Результаты данных расчетов были апробированы на специальном лабораторном стенде [11, С. 227-234].

Для оценки экономической целесообразности был произведен приблизительный расчет экономических затрат системы водоснабжения пгт. Новоорловск, определена себестоимость внедряемого комплекса и рассчитан срок его окупаемости. Отношение затрат на установку комплекса управления насосными агрегатами к годовой экономии средств, за счет использования данной системы, равно  $- 828\ 782\ \text{руб.} / 270\ 334\ \text{руб.} = 3,06$ . Срок окупаемости разрабатываемого комплекса составит примерно 3 года.

#### Заключение

Разработанная система позволит организовать максимально эффективный и практически бесперебойный процесс водоснабжения потребителей пгт. Новоорловск. Также данный комплекс может быть легко адаптирован для применения в системах водоснабжения аналогичной структуры. На текущий момент комплекс находится на стадии пробного внедрения.

#### Финансирование

Работа выполняется в рамках реализации проекта «Снижение энергетических затрат при эксплуатации скважинных насосных агрегатов систем водоснабжения путем разработки комплекса автоматического управления», финансируемого Советом по грантам Президента Российской Федерации (приказ №637).

#### Конфликт интересов

Не указан

#### Funding

The work is carried out in the framework of the project "Reduction of energy costs in the operation of downhole pumping units of water supply systems by developing an automatic control system", funded by the Council on grants of the President of the Russian Federation (order No. 637).

#### Conflict of Interest

None declared

#### Список литературы / References

1. МДК 3-02.2001 Правила технической эксплуатации систем и сооружений. М.: 2000. 93 с.
2. Терехов Л.Д. Водоснабжение и водоотведение в северных климатических условиях: учебное пособие/Л.Д. Терехов, О.В. Акимов, Ю.М. Акимова – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2008. – 124 с.: ил.
3. Григорьев В.В. Расчет условий совместной прокладки трубопроводов надземным способом / Григорьев В.В., Захаров П.Е., Кондаков А.С., Ларионова И.Г. // Математические заметки СВФУ, - 2017. Т. 24. - № 3. - С. 78-89.
4. Палкин Г.А. Способы повышения экономической эффективности и надежности эксплуатации участков первого подъема систем водоснабжения с накапливающим резервуаром / Палкин Г.А., Горбунов Р.В. // Международный научно-исследовательский журнал. Екатеринбург: Компания ПОЛИГРАФИСТ, 2015. Ч.1 - №2-1 (33). - С. 59-60.

5. Палкин Г.А. Повышение отказоустойчивости системы водоснабжения путем управления насосными агрегатами / Палкин Г.А., Горбунов Р.В., Суворов И.Ф. // Информационные технологии в моделировании и управлении: подходы, методы, решения: Сборник научных статей I Всероссийской научной конференции 12-14 декабря 2017. – Тольятти: Издатель Качалин Александр Васильевич, 2017. Ч.2 – 656 с.

6. Палкин Г.А. Управление насосными агрегатами первого подъема системы водоснабжения с накапливающим резервуаром / Палкин Г.А., Суворов И.Ф. // Современные наукоемкие технологии, 2017. - № 7. - С. 55-60.

7. Пат. 2593649С1 Российская Федерация МПК G05D 9/00, G05D 7/00, G05D 23/00 Способ регулирования уровня жидкости в емкости-сборнике и цифровая система для его осуществления / Г.А. Палкин, Р.В. Горбунов, И.Ф. Суворов, Д.А. Дейс; патентообладатель Заб. гос. ун-т. - №2015118302/28; заявл. 15.05.2015; опубл. 10.08.2016, Бюл. № 22. – 10 с.: ил.

8. Шевелев Ф.А. Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб / Ф.А. Шевелев, А.Ф. Шевелев. М.: Стройиздат, 1984. 177 с.

9. Цветков Ф.Ф. Задачник по тепломассообмену / Ф.Ф. Цветков, Р.В. Керимов, В.И. Величко. - 2-е изд., исправ. и доп. М.: Издательский дом МЭИ, 2008. 196 с., ил.

10. Палкин Г.А. Компьютерное моделирование трубопроводов надземной прокладки с целью оценки их тепловых параметров / Палкин Г.А., Кобылкин М.В., Суворов И.Ф. // Научно-технический вестник Поволжья, - 2018. - № 12. - С. 271-274.

11. Palkin G. Evaluation of ways to improve the energy efficiency of the sites of the first rise supply water systems with a storage tank by laboratory modeling / Palkin G., Suvorov I., Gorbunov R. // International Ural Conference on Green Energy (UralCon), Chelyabinsk, IEEE Xplore, 2018. pp. 227-234. doi: 10.1109/URALCON.2018.8544369

#### Список литературы на английском языке / References in English

1. MDK 3-02.2001 Pravila tehničkoj eksploatacii sistem i sooruzheniy kommunalnogo vodospabzheniya i kanalizacii [Rules of technical operation of systems and structures of public water supply and Sewerage]. Moscow, 2000, 93 p. [in Russian]

2. Terekhov L.D. Vodospabzhenie i vodootvedenie v severnykh klimaticheskikh usloviyakh [Water supply and sanitation in Northern climatic conditions]/L.D. Terekhov, O.V. Akimov, YU.M. Akimova. Khabarovsk, FESURT Publ, 2008, 124 p., ill. [in Russian]

3. Grigor'ev V.V. Raschet uslovij sovmestnoj prokladki truboprovodov nadzemnym sposobom [Calculation of conditions for joint laying of overground pipelines] / Grigor'ev V.V., Zaharov P.E., Kondakov A.S., Larionova I.G. Matematicheskie zametki SVFU [Mathematical notes of NEFU], – 2017. vol. 24. - No.3. - pp. 78-89. [in Russian]

4. Palkin G.A. Sposoby povysheniya ekonomicheskoy effektivnosti i nadezhnosti ekspluatatsii uchastkov pervogo pod'emna system vodospabzheniya s nakaplivayushchim rezervuarom [Ways to improve the economic efficiency and reliability of operation the first lifting area in water supply systems with a storage reservoir] / Palkin G.A., Gorbunov R.V. Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal [International research journal]. Ekaterinburg: the Company POLYGRAPHIST Publ. - 2015, part. 1. - No.2-1(33). - pp. 59-60. [in Russian]

5. Palkin G.A. Povyshenie otkazoustojchivosti sistemy vodospabzheniya putem upravleniya nasosnymi agregatami [Increasing fault tolerance of the water system by controlling pumping units] / Palkin G.A., Gorbunov R.V., Suvorov I.F. // Informacionnye tekhnologii v modelirovanii i upravlenii: podhody, metody, resheniya: Sbornik nauchnyh statej I Vserossijskoj nauchnoj konferencii 12-14 dekabrya 2017 [Information technologies in modeling and management: approaches, methods, solutions: Collection of scientific articles of the I all-Russian scientific conference: December 12-14, 2017].– Tolyatti: Kachalin Aleksandr Vasilevich, 2017. part. 2. – 656 p. [in Russian]

6. Palkin G.A. Upravlenie nasosnymi agregatami pervogo podema system vodospabzheniya s nakaplivayushim rezervuarom [Control of the first lifting pumping units on water supply system with storage reservoir] / Palkin G.A., Suvorov I.F. // Sovremennye naukoemkie tekhnologii [Modern science-intensive technologies].- 2017. - No.7. - pp. 55-60. [in Russian]

7. Pat. 2187888 Russian Federation, MPK G05D 9/00, G05D 7/00, G05D 23/00 Sposob regulirovaniya urovnya zhidkosti v emkosti-sbornike i cifrovaya sistema dlya ego osushchestvleniya [A method for regulating the liquid level in the collection vessel and a digital system for its implementation] / G.A. Palkin, R.V. Gorbunov, I.F. Suvorov, D.A. Dejs; the applicant and the patentee Trans-Baikal State University. – No 2015118302/28; appl. 15.05.2015; publ. 10.08.2016, Bul.Number 22 – 10p.: il. [in Russian]

8. Shevelev F.A. Tablicy dlya gidravlicheskogo rascheta vodoprovodnykh trub [Tables for the hydraulic calculation of water pipes]/F.A. Shevelev, A.F. Shevelev. Moscow, Stroyizdat Publ, 1984, 177 p. [in Russian]

9. Tsvetkov F.F. Zadachnik po teplomassoobmenu [Problem book in heat and mass transfer] / F.F. Tsvetkov, R.V. Kerimov, V.I. Velichko. Moscow, MEI Publ, 2008, 196 p., ill. [in Russian]

10. Palkin G.A. Kompyuternoe modelirovanie truboprovodov nadzemnoj prokladki s celyu ocenki ih teplovykh parametrov [Computer simulation of above the ground pipelines with the purpose of estimation of their heat parameters] / Palkin G.A., Kobylykin M.V., Suvorov I.F. // Nauchno-tekhnicheskij vestnik Povolzhya [Scientific and technical bulletin of the Volga region], - 2018. No.12. - pp. 271-274. [in Russian]

11. Palkin G. Evaluation of ways to improve the energy efficiency of the sites of the first rise supply water systems with a storage tank by laboratory modeling / Palkin G., Suvorov I., Gorbunov R. // International Ural Conference on Green Energy (UralCon), Chelyabinsk, IEEE Xplore, 2018. pp. 227-234. doi: 10.1109/URALCON.2018.8544369

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.90.12.017>

## ПРИМЕНЕНИЕ ТРЕПЕЛА В ПРОИЗВОДСТВЕ ФАСАДНОЙ КЕРАМИКИ, ПОЛУЧАЕМОЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТЕКЛОБОЯ

Научная статья

Виткалова И.А.<sup>1</sup>, Торлова А.С.<sup>2</sup>, Пикалов Е.С.<sup>3,\*</sup>

<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-9675-6432;

<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-1622-5584;

<sup>3</sup> ORCID: 0000-0001-9380-8014;

<sup>1, 2, 3</sup> Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, Владимир, Россия

\* Корреспондирующий автор (evgeniy-pikalov[at]mail.ru)

### Аннотация

В данной работе представлены результаты разработки состава шихты, включающего малопластичную глину как основной компонент, борную кислоту как плавень, стеклобой как флюсующе-упрочняющую добавку и трепел как компонент, образующий мелкопористую структуру керамики. Результаты работы включают в себя зависимости прочности на изгиб и теплопроводности фасадной керамики от соотношения компонентов шихты, подтверждающие роль каждой из добавок и позволяющие определить их соотношение, обеспечивающее эксплуатационные показатели керамики. В работе также содержатся сведения об основных физико-механических свойствах разработанного материала, из которых следует, что полученная керамика является энергоэффективной, позволяет получать изделия с пониженной массой и соответствующие нормативным требованиям, предъявляемым к плиткам для наружной облицовки стен и цоколей.

**Ключевые слова:** облицовочная керамика, самоглазурование, малопластичная глина, энергоэффективность, стеклобой, трепел.

## APPLICATION OF FOSSIL MEAL IN FACADE CERAMICS PRODUCTION, OBTAINED USING GLASS SCRAP

Research article

Vitkalova I.A.<sup>1</sup>, Torlova A.S.<sup>2</sup>, Pikalov E.S.<sup>3,\*</sup>

<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-9675-6432;

<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-1622-5584;

<sup>3</sup> ORCID: 0000-0001-9380-8014;

<sup>1, 2, 3</sup> Vladimir State University named after Alexandr and Nikolay Stoletovs, Vladimir, Russia

\* Corresponding author (evgeniy-pikalov[at]mail.ru)

### Abstract

This work presents the mixture composition development results, including low-plastic clay as the main component, boric acid as a fluxing agent, glass scrap as a flux-hardening additive and a fossil meal as a component forming a finely porous ceramic structure. The results of the work include the dependences of the bending strength and thermal conductivity of facade ceramics on the ratio of the components of the mixture, confirming the role of each of the additives and allowing to determine their ratio, ensuring the performance of ceramics. The work also contains information on the basic physical and mechanical properties of the developed material, from which it follows that the obtained ceramics is energy efficient, which allows obtaining products with reduced mass and meeting the regulatory requirements for tiles for external cladding of walls and socles.

**Keywords:** facade ceramics, self-glazing, low-plastic clay, energy efficiency, glass scrap, fossil meal.

### Введение

Наружная облицовка стен и цоколей зданий керамическими изделиями широко и успешно применяется как в малом, так и в высотном строительстве. По сравнению с другими материалами, применяемыми для облицовки фасадов, керамика характеризуется сохранением своих свойств в широком интервале температур, низким водопоглощением, высокой морозостойкостью и механической прочностью, в т.ч. возможностью выдерживать практически любые ветровые нагрузки, которые повышаются с увеличением высоты здания. Стоит учитывать и то, что керамика является одним из лучших вариантов с точки зрения эстетики фасада [1], [2].

Как и любой другой материал керамика обладает недостатками, к которым относятся сравнительно большая масса, создающая нагрузку на стены и фундамент, высокая стоимость изделий, хрупкость, ломкость и низкая паропроницаемость, препятствующая испарению влаги из стен, что ухудшает теплоизоляцию и срок службы здания.

Хрупкость и ломкость обуславливают необходимость осторожного монтажа изделий. Чтобы исключить проблему низкой паропроницаемости необходимо проводить монтаж фасадной керамики на обрешетку по системе вентилируемых фасадов.

Дополнительным преимуществом фасадной керамики, позволяющим минимизировать ее недостатки и повысить эксплуатационные свойства изделий, являются широкие возможности по ее модификации функциональными добавками.

Авторами данной работы ранее проводились исследования по разработке облицовочной керамики, в которых себестоимость изделий была снижена за счет использования глинистого сырья низкого качества и введения в состав шихты компонентов с низкой стоимостью, в т.ч. техногенных отходов. Основным преимуществом полученных

материалов являлись жидкофазное спекание за счет применения легкоплавких компонентов и плавней, благодаря которому повышаются прочность и морозостойкость, а также происходит самоглазурирование поверхности изделий, что улучшает их внешний вид, снижает трещинообразование и водопоглощение [3], [4], [5]. Снижение массы изделий в проведенных разработках достигалось повышением их пористости, что дополнительно позволило повысить их энергоэффективность [4], [5], [6].

В одной из проведенных работ для обеспечения энергоэффективности облицовочной керамики с эффектом самоглазурирования и жидкофазным спеканием применялся трепел [7]. Целью данной работы являлось определение количества трепела относительно других компонентов шихты для получения фасадной керамики с высокими значениями эксплуатационных свойств при пониженных величинах плотности и теплопроводности.

#### Методы и принципы исследования

В исследуемом составе шихты основным компонентом являлась глина Суворотского месторождения Владимирской области, число пластичности которой, определенное по стандартной методике, составляет 5,2, что свидетельствует о малой пластичности глины и является причиной низкой прочности и высокого водопоглощения получаемых из нее изделий. Следовательно, необходимо введение специальных добавок для повышения качества изделий. Применяемая глина имеет следующий состав (в мас. %):  $\text{SiO}_2 = 67,5$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 10,75$ ;  $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 5,85$ ;  $\text{CaO} = 2,8$ ;  $\text{MgO} = 1,7$ ;  $\text{K}_2\text{O} = 2,4$ ;  $\text{Na}_2\text{O} = 0,7$  [4], [5], [6].

В качестве порообразующей добавки применялся трепел Пекшинского месторождения Владимирской области, содержащий в своем составе (в мас. %):  $\text{SiO}_2 = 74,2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 6,9$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 9,4$ ;  $\text{CaO} = 2,2$ ;  $\text{MgO} = 1,6$ . Выбор трепела объясняется возможностью повысить пористость при сохранении достаточно высоких прочностных показателей [7], [8], [9].

Добавкой для повышения прочности изделий за счет жидкофазного спекания являлся бой листового оконного стекла, получаемый в результате измельчения отходов потребления, следующего состава (в мас. %):  $\text{SiO}_2 = 73,5$ ;  $\text{CaO} = 7,4$ ;  $\text{MgO} = 1,9$ ;  $\text{Na}_2\text{O} = 11,1$ ;  $\text{K}_2\text{O} = 5,2$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 0,9$  [5], [7].

В качестве плавня в состав шихты вводилась борная кислота марки В 2-го сорта по ГОСТ 18704-78, содержащая не менее 98,6 мас. % основного вещества. Борная кислота снижает температуру жидкофазного спекания и совместно со стеклосоем обеспечивает эффекты самоглазурирования и остекловывания керамики [3], [5].

Перед использованием глина, трепел и стеклосоем раздельно измельчались для получения размера частиц не более 0,63 мм и высушивались до постоянной массы. Затем все компоненты перемешивались в сухом состоянии, после смесь увлажнялась до 8 мас. % и снова перемешивалась до получения формовочной массы. Образцы исследуемой керамики получали из формовочной массы путем прессования при удельном давлении 15 МПа и обжига при максимальной температуре обжига 1050 °С.

У образцов по стандартным для строительной керамики методикам определяли прочность на сжатие ( $\sigma_{\text{сж}}$ , МПа) и изгиб ( $\sigma_{\text{изг}}$ , МПа), водопоглощение (В, %), морозостойкость (М, циклы), открытую ( $P_{\text{отк}}$ , %) и общую ( $P_{\text{общ}}$ , %) пористости, плотность ( $\rho$ ,  $\text{кг/м}^3$ ) и теплопроводность ( $\lambda$ ,  $\text{Вт/м}^\circ\text{С}$ ).

#### Основные результаты

В результате ранее проведенных исследований было выявлено, что максимальная прочность и минимальное водопоглощение для разрабатываемого состава шихты обеспечиваются при использовании 5 мас. % борной кислоты [7]. На первом этапе данной работы были изучены зависимости для основных эксплуатационных показателей от соотношения трепела и стеклосоя (СБ) в составе шихты.

Из представленных на рисунке 1 результатов экспериментов видно, что прочность на изгиб разрабатываемой керамики повышается с увеличением количества стеклосоя и уменьшается с увеличением количества трепела.

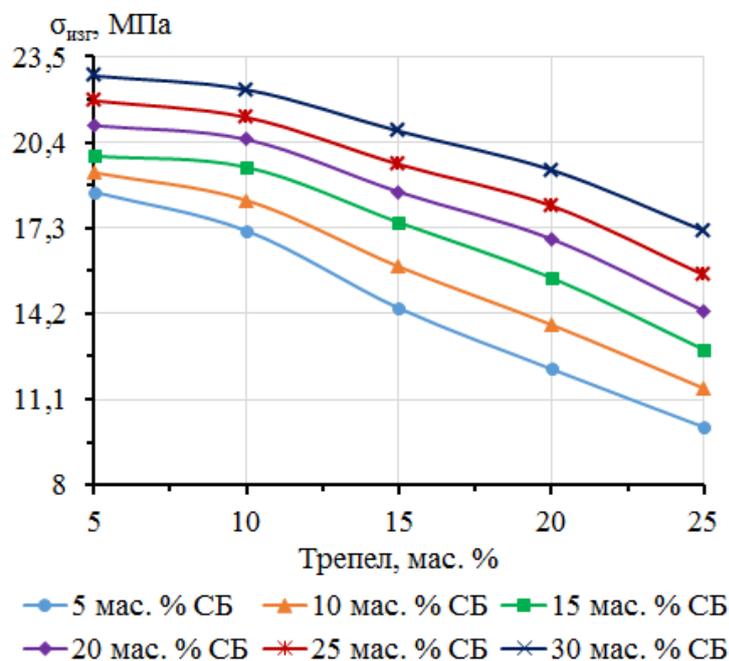


Рис. 1 – Влияние трепела и стеклосоя на прочность на изгиб керамики

Характер полученных зависимостей объясняется влиянием исследуемых добавок на пористость материала, повышение которой, как известно, приводит к снижению прочности материала.

Влияние стеклобоя заключается в том, что данный компонент шихты плавится при обжиге, заполняя поры и образуя слои стеклофазы между частицами керамики, что позволяет сформировать из них прочный каркас. Флюсующее действие борной кислоты усиливает влияние стеклобоя, повышая количество расплава и снижая температуру его образования.

В свою очередь трепел является порообразующей добавкой, основу которого составляют микрочастицы опала  $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  [10]. При температурах 450-800 °С во время обжига из этих частиц удаляется химически связанная вода, что повышает пористость материала. Наличие флюсующих оксидов железа, кальция и магния в составе применяемого трепела наряду со стеклобоем и борной кислотой способствует жидкофазному спеканию. После удаления химически связанной воды и расплавления флюсующих оксидов микрочастицы кремния вместе с расплавом заполняют крупные пустоты между частицами керамики, способствуя формированию мелкопористой структуры [7], [8], [9]. При этом между частицами керамики образуются перемычки из слоев стеклофазы, заполненной микрочастицами кремния [7].

Из данных, приведенных на рисунке 2, видно, что теплопроводность материала повышается при увеличении количества стеклобоя и понижается с ростом содержания трепела.

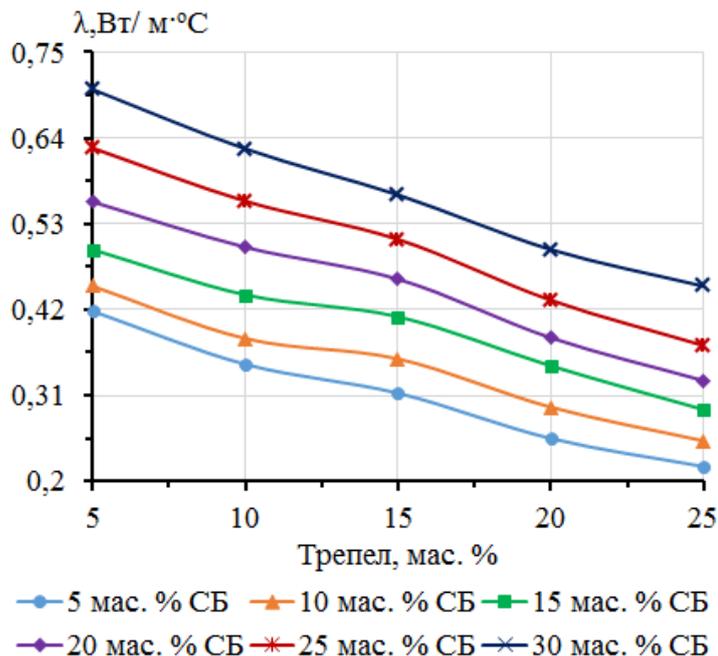


Рис. 2 – Влияние трепела и стеклобоя на теплопроводность керамики

Характер полученных зависимостей также объясняется влиянием исследуемых добавок на пористость материала, повышение которой, как известно, приводит к снижению теплопроводности.

Так как целью проводимых исследований было получение энергоэффективной фасадной керамики, в соответствии с ГОСТ 13996-93 прочность на изгиб материала должна быть не ниже 16 МПа. В связи с этим выбираем состав шихты, позволяющий максимально понизить теплопроводность при соблюдении требований по прочности на изгиб, т.е. состав, включающий 3 мас. % стеклобоя и 12 мас. % трепела.

На втором этапе выполненных экспериментов был определен комплекс свойств фасадной керамики на основе выбранного состава шихты и проведено сравнение их значений с нормативными требованиями, представленное в таблице.

Таблица – Свойства разработанной фасадной керамики

Свойство керамики	Требования ГОСТ 13996-93 для плиток		Разработанная керамика
	стенowych	цокольных	
$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	-	-	1828,9
$\sigma_{сж}$ , МПа	-	-	31,4
$\sigma_{изг}$ , МПа	16	8	16,1
V, %	2-9	2-5	2,4
M, циклы	> 40	> 50	53
$\lambda$ , Вт/(м·°C)	-	-	0,31

### Обсуждение

Полученные результаты экспериментов показывают, что на основе разработанного состава шихты может быть получена керамика, соответствующая требованиям, предъявляемым к плиткам для наружной облицовки стен и цоколей. Теплопроводность данного материала позволяет в соответствии с ГОСТ 530-2012 отнести его к эффективным по теплотехническим характеристикам ( $\lambda = 0,24-0,36$  Вт/(м·°C)). Плотность керамики позволяет

получить массу изделий, равную  $16,5 \text{ кг/м}^2$  при толщине 9 мм, что меньше средней массы керамогранитных плиток, равной  $25\text{-}35 \text{ кг/м}^2$  при толщине 10-12 мм, и средней массы терракотовых и клинкерных плиток, равной  $35\text{-}75 \text{ кг/м}^2$  при толщине 19 мм. Таким образом, полученный керамический материал может эффективно использоваться в качестве фасадной керамики.

#### Заклучение

В результате проведенных исследований был разработан состав шихты на основе малопластичной глины, дополнительно включающий 5 мас. % борной кислоты, 3 мас. % стеклобоя и 12 мас. % трепела. При использовании трепела в производстве фасадной керамики стоит учитывать, что порообразующее действие добавки превышает ее упрочняющий эффект, поэтому в первую очередь трепел обеспечивает пористость материала, а стеклобой совместно с борной кислотой обеспечивают жидкофазное спекание, способствующее повышению прочности и увеличению доли закрытых пор за счет самоглазурирования поверхности изделий (для разработанного состава  $P_{\text{общ}} = 23,2 \%$ ,  $P_{\text{отк}} = 4,6 \%$ ).

Разработанный состав шихты дает возможность получить энергоэффективную фасадную керамику с пониженными массой и теплопроводностью изделий, что уменьшает тепловые потери через облицованную поверхность и снижает нагрузку на фундамент. Дополнительными преимуществами разработанного состава является возможность использования малопластичной глины и стеклобоя, что расширяет сырьевую базу керамического производства и способствует утилизации стекольных отходов.

#### Конфликт интересов

Не указан.

#### Conflict of Interest

None declared.

#### Список литературы / References

1. Воронцов В.М. Стекло и керамика в архитектуре: Учеб. пособие / В.М. Воронцов, И.И. Немец. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2010. – 106 с.
2. Андрианов Н.Т. Химическая технология керамики: Учеб. пособие для вузов / Н.Т. Андрианов, В.Л. Балкевич, А.В. Беляков; Под ред. И.Я. Гузмана. – М.: ООО РИФ «Стройматериалы», 2011. – 496 с.
3. Шахова В.Н. Получение облицовочной керамики с использованием несортированного боя тарных стекол / В.Н. Шахова, И.А. Виткалова, А.С. Торлова и др. // Экология и промышленность России. – 2019. – № 2. – С. 36–41.
4. Шахова В.Н. Разработка облицовочного керамического материала с эффектом самоглазурирования на основе малопластичной глины / В.Н. Шахова, А.В. Березовская, Е.С. Пикалов и др. // Стекло и керамика. – 2019. – № 1. – С. 13–18.
5. Виткалова И.А. Применение полимерных и стекольных отходов для получения самоглазурирующей облицовочной керамики / И.А. Виткалова, А.С. Торлова, Е.С. Пикалов и др. // Экология и промышленность России. 2019. №11. С. 38–42.
6. Перовская К.А. Применение полимерных отходов для повышения энергоэффективности стеновой керамики / К.А. Перовская, Д.Е. Петрина, Е.С. Пикалов и др. // Экология промышленного производства. – 2019. – №1. – С. 7–11.
7. Торлова А.С. Разработка энергоэффективной облицовочной керамики на основе местного сырья и стекольного боя / А.С. Торлова, И.А. Виткалова, Е.С. Пикалов и др. // Экология промышленного производства. – 2019. – №3. – С. 22–26.
8. Дятлова Е.М. Теплоизоляционные материалы, полученные с применением трепела / Е.М. Дятлова, С.Л. Радченко, О.А. Коховец // Огнеупоры и техническая керамика. 2006. № 6. С. 43–47.
9. Салахова Р.А. Высокопрочные керамические стеновые изделия из легкоплавких глинистых и опал-кристобалитовых пород: автореф. дис. ... канд. техн. наук - Казань, 2011.
10. Кузнецов В.Г. Осадочные горные породы и их изучение: учеб. пособие для вузов / В.Г. Кузнецов – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2007. – 511 с.

#### Список литературы на английском языке / References in English

1. Voroncov V.M. Steklo i keramika v arhitekture [Glass and ceramics in architecture]: Textbook / V.M. Voroncov, I.I. Nemes. – Belgorod: publishing house BGTU, 2010. – 106 p. [in Russian]
2. Andrianov N.T. Himicheskaya tekhnologiya keramiki [Chemical technology of ceramics]: Textbook for universities / N.T. Andrianov, V.L. Balkevich, A.V. Belyakov et al; Eds. I.Ya. Guzman. – M.: ООО РИФ «Стройматериалы», 2011. – 496 p. [in Russian]
3. Shakhova V.N. Poluchenie oblicovochnoj keramiki s ispol'zovaniem nesortirovannogo boya tarnyh stekol [Receiving of ceramic veneer with the use of unsorted container glass breakage] / V.N. Shakhova, I.A. Vitkalova, A.S. Torlova et al // Ekologiya i promyshlennost' Rossii [Ecology and Industry of Russia]. – 2019. – №2. – P. 36–41. [in Russian]
4. Shakhova V.N. Razrabotka oblicovochnogo keramicheskogo materiala s efektom samoglazurovaniya na osnove maloplastichnoj gliny [Development of Self-Glazing Ceramic Facing Material Based on Low-Plasticity Clay] / V.N. Shakhova, A.V. Berezovskaya, E.S. Pikalov et al // Steklo i keramika [Glass and Ceramic]. – 2019. – № 1. – P. 13–18. [in Russian]
5. Vitkalova I.A. Primenenie polimernyh i stekol'nyh othodov dlya polucheniya samoglazuruyushcheysya oblicovochnoj keramiki [Application of polymer and glass waste to produce self-glazing facing ceramics] / I.A. Vitkalova, A.S. Torlova, E.S. Pikalov et al // Ekologiya i promyshlennost' Rossii [Ecology and industry of Russia]. 2019. №11. P. 38–42. [in Russian]
6. Perovskaya K.A. Primenenie polimernyh othodov dlya povysheniya energoeffektivnosti stenovoy keramiki [Application of polymer waste for improvement the energy efficiency of wall ceramics] / K.A. Perovskaya, D.E. Petrina, E.S. Pikalov et al // Ekologiya promyshlennogo proizvodstva [Ecology of industrial production]. – 2019. – №1. – P. 7–11. [in Russian]
7. Torlova A.S. Razrabotka energoeffektivnoj oblicovochnoj keramiki na osnove mestnogo syr'ya i stekol'nogo boya [Development of energy efficient facing ceramics based on local raw materials and cullet] / A.S. Torlova, I.A. Vitkalova, E.S. Pikalov et al // Ekologiya promyshlennogo proizvodstva [Ecology of industrial production]. – 2019. – №3. – P. 22–26. [in Russian]
8. Dyatlova E.M. Teploizolyacionnye materialy, poluchennye s primeneniem trepela [Thermal insulation materials obtained with the use of Trepel] / E.M. Dyatlova, S.L. Radchenko, O.A. Kohovec // Ogneupory i tekhnicheskaya keramika [Refractories and technical ceramics]. 2006. № 6. P. 43–47. [in Russian]
9. Salahova R.A. Vysokoprochnye keramicheskie stenovye izdeliya iz legkoplavkih glinistykh i opal-kristobalitovykh porod [High-strength ceramic wall products from fusible clay and opal-cristobalite rocks]: extended abstract of PhD in technical sciences dissertation - Kazan, 2011. [in Russian]
10. Kuznecov V.G. Osadochnye gornye породы i ih izuchenie: ucheb. posobie dlya vuzov [Sedimentary mountain rocks and their study] / V.G. Kuznecov – M.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2007. – 511 p. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.90.12.018>

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТРУБЧАТЫХ ПРОВОДНИКОВ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В ЛЭП

Научная статья

Ахметшин Р.С.<sup>1</sup>, Пичугин П.И.<sup>2,\*</sup>

<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-3911-6348;

<sup>1</sup> Набережночелнинский институт Казанского федерального университета, Набережные Челны, Россия;

<sup>2</sup> Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», Москва, Россия

\* Корреспондирующий автор (PavelPichugin999[at]yandex.ru)

### Аннотация

В данной статье изучается возможность применения трубчатых проводников с цельным алюминием в качестве альтернативы классическим многожильным проводам для уменьшения потерь мощности и напряжения при передаче электроэнергии. Предварительно был выполнен обзор современных видов проводов, используемых в воздушных линиях электропередач, выявлены их достоинства и недостатки. Расчётным путём было установлено, что трубчатые проводники будут обладать меньшим активным сопротивлением и меньшим погонным индуктивным сопротивлением в трёхфазной системе, что позволит сократить потери мощности и увеличить пропускную способность линии. Был рассмотрен возможный технический метод их производства, оценена перспектива улучшения механических свойств предлагаемых проводников посредством использования композитного сердечника.

**Ключевые слова:** трубчатые проводники; потери мощности; активное сопротивление; индуктивное сопротивление; плакирование.

## TUBULAR CONDUCTORS USAGE FOR REDUCING POWER LOSSES IN POWER LINES

Research article

Akhmetshin R.S.<sup>1</sup>, Pichugin P.I.<sup>2,\*</sup>

<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-3911-6348;

<sup>1</sup> Naberezhnye Chelny Institute of Kazan Federal University, Naberezhnye Chelny, Russia;

<sup>2</sup> National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russia

\* Corresponding author (PavelPichugin999[at]yandex.ru)

### Abstract

This paper explores the possibility of using tubular conductors with solid aluminum as an alternative to classic stranded wires to reduce power and voltage losses during power transmission over power lines. The author carried a preliminary review of the modern types of wires used in overhead power lines, identified their advantages and disadvantages. According to the calculation it was found that the tubular conductors have less active resistance and less linear inductive resistance in a three-phase system, which reduces power losses and increases line throughput. The author considers a possible technical method of their production, and analyses the prospects of improving the mechanical properties of the proposed conductors through the use of a composite core.

**Keywords:** tubular conductors; power loss; active resistance; inductive reactance; cladding.

### Введение

Одной из составляющих общих потерь в электрических сетях являются технические потери, которые обуславливаются физическими процессами рассеивания энергии. В России за последние годы технические потери в среднем составляют 10,8%, в то время этот показатель для ряда европейских стран в два раза меньше.

Потери электроэнергии в сетях – один из важнейших показателей работы электросетевого предприятия, отражающий техническое состояние и качество эксплуатации электрических сетей, уровень морального и технического старения. «Уменьшение потерь электроэнергии в сетях различного назначения является одним из основных направлений реализации энергосберегающей политики в стране и в мире» [1, С. 50].

Из всех объектов электрических сетей на линии электропередач (ЛЭП) приходится значительная часть всех потерь электрической энергии, составляющая 65%, из которых 60% являются нагрузочными потерями, 5% относятся к потерям на холостой ход и корону [2]. Исходя из этого, ЛЭП являются приоритетным объектом, к которому должны быть применены мероприятия по повышению энергоэффективности.

Поскольку потери активной  $\Delta P$  и реактивной  $\Delta Q$  мощности, а также потеря напряжения  $\Delta U$  (пренебрегая поперечной составляющей падения напряжения) прямо пропорциональны активному и реактивному сопротивлению линии [3], то одним из технических мероприятий по снижению потерь электрической энергии и величины потери напряжения может быть замена проводов на провода с большим сечением, соответственно, с более низким сопротивлением (также и для увеличения пропускной способности).

Анализируя конструкции использующихся в настоящее время и новейших образцов проводов ЛЭП, можно прийти к выводу, что в них сохраняются недостатки, приводящие к увеличению потерь мощности. Цель статьи состоит в рассмотрении современных видов проводов и изучении предлагаемого нами варианта конструктивного исполнения провода ЛЭП, имеющего меньшее активное и реактивное сопротивление по сравнению с классическими.

### Основная часть

Наибольшее распространение на воздушных линиях (ВЛ) получили неизолированные сталеалюминиевые провода. Стальной сердечник служит для обеспечения необходимой механической прочности, а токопроводящей частью является алюминий. Проводимость стального сердечника не учитывается, как и поверхностный эффект, которым при

промышленной частоте 50 Гц можно пренебречь вследствие значительной толщины проникновения тока в проводник. Основные, широко применяемые сталеалюминиевые провода марок АС, АСКС, АСКП и АСК являются многопроволочными, то есть поверх стального сердечника располагаются алюминиевые проволоки, скрученные определённым образом. Недостаток таких проводов состоит в том, что возникающие вследствие атмосферной электрохимической коррозии алюминия окислы между жилами провода ведут к повышению электрического сопротивления мест соприкосновения жил [4]. Коэффициент заполнения провода  $K_z$  (доля сечения, приходящаяся на металл) составляет 0,75, что заметно ниже у инновационных видов проводов (0,9-0,95), речь о которых пойдёт ниже.

С недавних пор также производятся и эксплуатируются провода, токопроводящей частью которых являются различные сплавы алюминия, например, Al-Si-Mg или алюминий-циркониевый Al-Zr сплав. Несмотря на то, что провода на основе обоих сплавов отличаются термостойкостью и увеличивают пропускную мощность ВЛЭП, более высокое удельное электрическое сопротивление сплавов по сравнению с алюминием ведёт к увеличению потерь в линии, а преимущество проводов с Al-Zr сплавом ощутимо в основном при относительно высоких температурах окружающей среды. Применение проводов из сплавов также требует должного уровня термостойкости и нагрузоустойчивости арматуры ВЛЭП, что делает их использование целесообразным на коротких участках ЛЭП и при необходимости большого запаса по пропускной способности в случае аварийных коммутаций [5, С. 13].

Другой путь повышения пропускной способности ВЛЭП состоит в применении компактных проводов. Их суть состоит в изменении конфигурации проволок в составе провода с целью увеличения коэффициента заполнения  $K_z$  рабочего сечения, что в свою очередь позволяет уменьшить диаметр провода при той же пропускной способности. В качестве примеров таких проводов можно привести провода с Z-образными или стреловидными проволоками (рис. 1). Преимущество данных проволок перед проволоками с трапециевидным профилем, являющимся классическим для компактного провода, состоит в отсутствии выталкивания повреждённой проволоки вследствие клинового эффекта [5, С. 10].

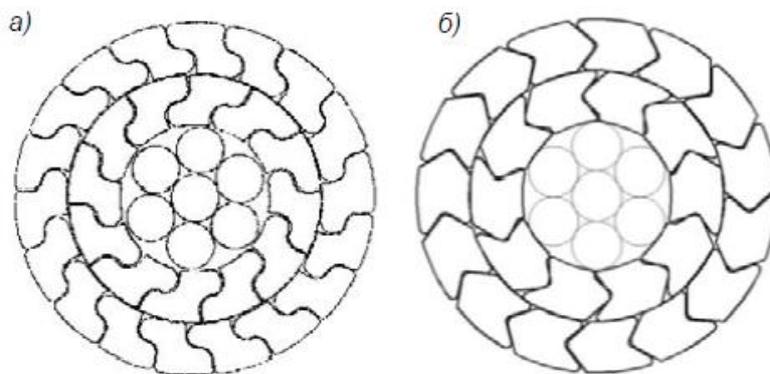


Рис. 1 – Сечения компактных проводов: а) с Z-образными проволоками; б) со стреловидными проволоками

Главным образом данные конфигурации помогают решить проблемы обледенения проводов, снижения уровня усталости металла в проводе и полного предотвращения внутренней коррозии провода [6, С. 71]. Недостатком как традиционного провода АС, так и новых видов проводов с профилированными проволоками, является тот факт, что каждая жила оказывает магнитное влияние на другие вследствие явления взаимной индукции, что приводит к возникновению в каждой жиле противодействующей электродвижущей силы, эффект от которой аналогичен повышению индуктивного сопротивления жилы.

Проведя вышеизложенный анализ существующих видов проводов, мы предлагаем иную модификацию сталеалюминиевого провода, лишённую недостатков, приведённых у упомянутых видов. Согласно варианту, на стальном сердечнике должна располагаться не скрутка алюминиевых жил, а цельный полый алюминиевый проводник, имеющий профиль трубы. Далее покажем, что данная геометрия трубчатого провода будет иметь меньшее активное и индуктивное сопротивления, обуславливающие потери мощности в линии. Замена классических сталеалюминиевых проводов на данный вид нашла бы применение для перегруженных линий или для линий с большим сроком эксплуатации, при котором значителен износ проводов, а также для вновь строящихся ЛЭП.

Для сравнения возьмём провод длиной  $l=1$  м марки АС 70/11. Он состоит из  $n=6$  алюминиевых проволок диаметром  $d_0=3,8$  мм, симметрично расположенных вокруг стального сердечника диаметром  $d_{серд}=3,8$  мм (рис. 2).

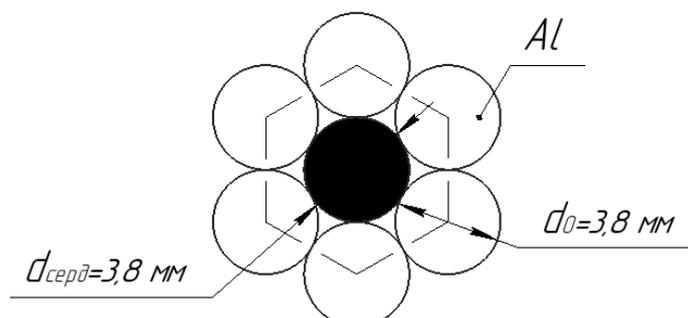


Рис. 2 – Провод АС 70/11

В предлагаемом варианте данный провод алюминиевые жилы заменяются на цельный алюминий так, чтобы внешний диаметр провода остался неизменным (рис. 3).

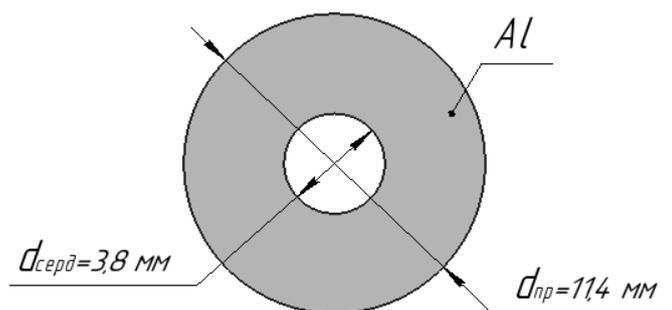


Рис. 3 – Видоизменённый провод АС 70/11

### 1. Сравнение активных сопротивлений проводов.

Поскольку ток в первом варианте растекается по 6 жилам, то результирующее активное сопротивление можно найти, рассматривая параллельное соединение шести жил и поделив сопротивление одной жилы на  $n=6$ . Сопротивление одной жилы найдём по формуле:

$$R_1 = \rho \frac{l}{S}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – удельное активное сопротивление материала провода. Для алюминия  $\rho = 2,5 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$

$S$  – площадь поперечного сечения жилы, которую можно найти следующим образом:

$$S = \pi \frac{d_0^2}{4} \quad (2)$$

Произведём расчёт. Площадь поперечного сечения жилы  $S$  равна:

$$S = \pi \frac{d_0^2}{4} = \pi \frac{(3,8 \cdot 10^{-3})^2}{4} = 11,34 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \quad (3)$$

Сопротивление одной жилы  $R_1$  и всего провода  $R$  соответственно равны:

$$R_1 = \rho \frac{l}{S} = 2,5 \cdot 10^{-8} \frac{1}{11,34 \cdot 10^{-6}} = 0,0022 \text{ Ом} \quad (4)$$

$$R = \frac{R_1}{6} = \frac{0,0022}{6} = 3,667 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \quad (5)$$

Для второго варианта провода нужно найти площадь поперечного сечения алюминиевой части  $S_{Al}$ :

$$S_{Al} = \pi \frac{d_{np}^2}{4} - \pi \frac{d_{серд}^2}{4} = \pi \frac{(11,4 \cdot 10^{-3})^2 - (3,8 \cdot 10^{-3})^2}{4} = 90,73 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \quad (6)$$

Сопротивление всего провода  $R_0$  во втором варианте равно:

$$R_0 = \rho \frac{l}{S} = 2,5 \cdot 10^{-8} \frac{1}{90,73 \cdot 10^{-6}} = 2,755 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \quad (7)$$

Отсюда видим, что активное сопротивление модифицированного провода ниже, чем у первого, на:

$$\Delta = \frac{R - R_0}{R} \cdot 100\% = \frac{(3,667 - 2,755) \cdot 10^{-4}}{3,667 \cdot 10^{-4}} \approx 25\% \quad (8)$$

## 2. Сравнение индуктивных сопротивлений проводов в трёхфазных линиях электропередач

В трёхфазных ЛЭП индуктивность одного провода определяется как собственной  $L$  индуктивностью, так и взаимной индуктивностью между другими двумя проводами. Эквивалентная индуктивность одного провода  $L_0$  находится по методу симметричных составляющих, из [7] находим формулу:

$$L_0 = L - M \quad (9)$$

Собственная индуктивность полого провода  $L$  (учитывая внутреннюю индуктивность алюминия) конфигурации, изображённой на рис. 3, находится по формуле [8]:

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left( \ln \frac{2l}{rc} - 1 \right), \quad (10)$$

где  $r$  – внешний радиус провода,  $r = d_{\text{пр}}/2$ ;

$c$  – величина, берущаяся из таблицы [8] в зависимости от отношения внутреннего радиуса полости к внешнему радиусу;

$\mu_0$  – магнитная постоянная (относительная магнитная проницаемость алюминия с большой степенью точности равна 1),  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;

$l$  – длина провода.

Взаимная индуктивность  $M$  между проводами трёхфазной линии находится по следующей формуле [7]:

$$M = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left( \ln \frac{2l}{D} - 1 \right), \quad (11)$$

где  $D$  – среднегеометрическое расстояние между проводами трёхфазной ЛЭП. Примем для дальнейших расчётов  $D = 5$  м (110 кВ).

Получаем формулу для эквивалентной индуктивности  $L_0$ :

$$L_0 = L - M = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left( \ln \frac{2l}{rc} - 1 \right) - \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left( \ln \frac{2l}{D} - 1 \right) = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{D}{rc} \quad (12)$$

Отсюда находим погонное сопротивление  $X_{\text{пог}}$  на 1 км длины провода  $l$ , приводимую в справочных данных:

$$X_{\text{пог}} = 2\pi f \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{D}{rc} = 1000 \mu_0 f \ln \frac{D}{rc}, \quad (13)$$

где  $f$  – частота тока,  $f = 50$  Гц.

Для сравнения индуктивных сопротивлений двух вариантов проводов возьмём 4 различных провода: АС 70/11, АС 95/16, АС 120/19, АС 240/56. Определяя их внутренний  $r_{\text{внут}}$  ( $d_{\text{сред}}/2$ ) и внешний  $r$  радиусы [9], и коэффициент  $c$  из [8], рассчитаем погонные индуктивности для этих четырёх марок. Взяв из справочных значений [10] погонные индуктивности для традиционных многожильных проводов, произведём относительно них сравнение рассчитанных значений. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение погонных индуктивных сопротивлений

Марка Параметр	АС 70/11	АС 95/16	АС 120/19	АС 240/56
Внутренний радиус $r_{\text{внут}}$ , мм	1,9	2,25	2,775	3,6
Внешний радиус $r$ , мм	5,7	6,75	7,6	10,8
Отношение $r_{\text{внут}}/r$	0,333	0,333	0,365	0,333
Коэффициент $c$	0,8153	0,8153	0,8217	0,8153
Погонное сопротивление для полого провода $X_{\text{пог}}$ , Ом/км	0,4386	0,4280	0,4201	0,3985
Погонное сопротивление для традиционного провода $X_{\text{трад}}$ , Ом/км	0,444	0,434	0,427	0,405
Разница относительно $X_{\text{трад}}$ , %	-1,21	-1,38	-1,63	-1,61

Из расчётов в двух пунктах видно, что погонное индуктивное сопротивление полых проводов ниже, чем таковое у традиционных многожильных проводов (на 1,2-1,6%), несмотря на параллельное соединение жил в последних. Разница в значениях хотя и не столь значительная, но более высокое индуктивное сопротивление многожильных проводов предопределяет дополнительные потери мощности в сети. Особо значительная разница наблюдается в активных сопротивлениях проводов. Пониженный коэффициент заполнения многожильных проводов по сравнению с предлагаемыми полыми, а также дополнительное образование окислов между жилами в процессе эксплуатации приводят к значительным потерям активной мощности (в примере 25%). Отсюда можно сделать вывод, что по своим электрическим характеристикам полые провода предпочтительнее классических многожильных.

Особо стоит остановиться на вопросе технического производства такого вида провода. В России впервые освоено производство стальной проволоки, плакированной алюминием. «Плакирование — метод нанесения тонкого защитного слоя металла на поверхность другого металла или сплава термомеханическим способом» [11, С. 44]. Процесс изготовления заключается в волочении алюминиевой трубы, внутрь которой вставлен сердечник из стали. В результате диффузии под влиянием совместной деформации горячей заготовки происходит сцепление между металлами. Плакированная стальная проволока находит применение в изделиях, требующих повышенной коррозионной и механической стойкости, при высоких температурных нагрузках. Хотя этот метод и служит для защиты поверхности одного металла другим, он вполне может быть использован для производства цельных алюминиевых проводов, поскольку в результате получается стальной сердечник со слоем алюминия на его поверхности.

Поскольку нагрузка на стальной сердечник у полого провода будет выше, чем у многожильного, то в случае невыполнения стальным сердечником расчётных механических нагрузок можно рассмотреть его замену на композитный сердечник, разработка проводов с которым в настоящее время активно развивается. Провода с композитным сердечником (с алюминиевой или полимерной матрицей) имеют весьма высокие прочностные характеристики, меньшую массу, устойчивость к провисанию и высокую термостойкость [5, С. 14].

#### Заключение

Таким образом, применение полых (трубчатых) проводов для передачи электроэнергии благодаря наличию у них более низких активных и индуктивных сопротивлений способствует снижению электрических потерь мощности и потерь напряжения при передаче электроэнергии, что повышает энергоэффективность всей ЛЭП в целом. Производство трубчатых проводников может производиться с помощью метода плакирования. Перспективным бы был вопрос использования композитных сердечников для данного вида провода.

#### Конфликт интересов

Не указан.

#### Conflict of Interest

None declared.

#### Список литературы / References

1. Геркусов А.А. Техничко-экономическое нормирование потерь электроэнергии в воздушных линиях электропередачи напряжением 110 кВ и выше / Геркусов А.А., Макаров В.М. // Вестник ИГЭУ. – 2016. – № 4. – С. 49 – 56.
2. Лыкин А.В. Электрические системы и сети: Учеб. пособие / Лыкин А.В. – М.: Университетская книга; Логос, 2008. – 254 с.
3. Идельчик В.И. Электрические системы и сети / Идельчик В.И. – М.: Энергоатомиздат, 1989. - 592 с.: ил.
4. Шкрабец Ф.П. Влияние коррозии алюминия на электрические параметры ЛЭП / Ф.П. Шкрабец, П.Ю. Красовский // Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук. - техн. зб. - 2007. - Вип. 79. - С. 36-39.
5. Лопарев В.В. Об особенностях современных неизолированных проводов для воздушных линий электропередачи / В.В. Лопарев, Ю.В. Образцов // Кабели и провода. – 2014. – № 6. – С. 9–15.
6. Курьянов В.Н. Инновационные высокоэффективные провода для линий электропередачи / В.Н. Курьянов, М.М. Султанов, В.А. Фокин и др. // Энергия единой сети. – 2016. – №4 (27). – С. 70-78.
7. Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники: в 3-х т. Учебник для вузов. Том 3. –4-е изд / Демирчян К.С., Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин. – СПб.: Питер, 2003. – 377 с.: ил.

8. Калантаров П. Л. Расчёт индуктивностей. Справочная книга / Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А.— Ленинград: «Энергия», 1986. — 488 с.
9. АС – неизолированный сталеалюминиевый провод – URL: <https://linijaopory.ru/as-neizolirovannyj-stalealuminievyyj-provod/> (дата обращения: 07.11.2019).
10. Ершевич В.В. Справочник по проектированию электроэнергетических систем [Текст] / В.В. Ершевич, А.Н. Зейлигер, Г.А. Илларионов [и др.]; под ред. С.С. Рокотяна и И.М. Шапиро. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 352 с.
11. Боксимер М. Э. Инновации на энергетическом рынке / М.Э. Боксимер // ЭнергоStyle. – 2011. – №2 (15). – С. 44-45.

#### Список литературы на английском языке / References in English

1. Gerkusov A.A. Tekhniko-ekonomicheskoye normirovaniye poter' elektroenergii v vozdushnykh liniyakh elektropredachi napryazheniyem 110 kV i vyshе [Technical and economic standardization of electricity losses in overhead power transmission lines with voltage of 110 kV and higher] / Gerkusov A.A., Makarov V.M. // Vestnik IGEU [Bulletin of Ivanovo State Energy University]. – 2016. – № 4. – P. 49 – 56. [in Russian]
2. Lykin A.V. Elektricheskiye sistemy i seti: Ucheb. posobiye [Electrical systems and networks. Textbook] / Lykin A.V. – М.: Universitetskaya kniga [University book]; Logos, 2008. – 254 p. [in Russian]
3. Idelchik V.I. Elektricheskiye sistemy i seti [Electrical systems and networks. Textbook] / Idelchik V.I. – М.: Energoatomizdat, 1989. - 592 p.: il. [in Russian]
4. Shkrabets F.P. Vliyaniye korrozii alyuminiya na elektricheskiye parametry LEP [The influence of aluminum corrosion on the electrical parameters of power transmission lines] / Shkrabets F.P., Krasovskiy P.Yu. Gírnicha yelektromekhanika ta avtomatika [Mining Electromechanics and Automation]; Nauk. - tekhn. zb. [Scientific and Technical collection] - 2007. - Issue. 79. - P. 36-39. [in Russian]
5. Loparev V.V. Ob osobennostyakh sovremennykh neizolirovannykh provodov dlya vozdushnykh liniy elektropredachi [About the features of modern non-insulated wires for overhead power transmission lines] / Loparev V.V., Obraztsov Yu.V. // Kabeli i provoda [Cables and wires]. – 2014. – № 6. – P. 9–15. [in Russian]
6. Kur'yanov V.N. Innovatsionnyye vysokoeffektivnyye provoda dlya liniy elektropredachi / V.N. Kur'yanov, M.M. Sultanov, V.A. Fokin et al. // Energiya yedinoi seti [Innovative high-performance wires for power transmission lines // Energy of a unified network]. – 2016. – № 4 (27). – P. 70-78. [in Russian]
7. Demirchyan K.S. Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki: v 3-kh t. Uchebnik dlya vuzov. Tom 3 [Theoretical foundations of electrical engineering: in 3 volumes. Textbook for Universities. Volume 3] / Demirchyan K.S., Neyman L.R., Korovkin N.V., Chechurin V.L. – 4-edition. – SPb.: Piter, 2003. – 377 p.: il. [in Russian]
8. Kalantarov P. L. Raschot induktivnostey. Spravochnaya kniga [Calculation of inductances. Handbook] / Kalantarov P. L., Tseytlin L. A. — Ленинград: «Энергия», 1986. — 488 p. [in Russian]
9. AS – неизолированный сталеалюминиевый провод [AS - non-insulated steel-aluminum wire] – URL: <https://linijaopory.ru/as-neizolirovannyj-stalealuminievyyj-provod/> (date of access: 07.11.2019). [in Russian]
10. Yershevich V.V. Spravochnik po proyektirovaniyu elektroenergeticheskikh system [Power Systems Design Handbook] / V.V. Yershevich, A.N. Zeylinger, G.A. Illarionov [et al.]; pod red. Rokotyana S.S. i Shapiro I.M. - 3-edition., pererab. i dop. -M.: Energoatomizdat, 1985. - 352 p. [in Russian]
11. Boksimer M. E. Innovatsii na energeticheskom rynke [Energy Market Innovations] / M. E. Boksimer // EnergoStyle. – 2011. – №2 (15) – P. 44-45. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.90.12.019>

## ИССЛЕДОВАНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ БЕСКОНТАКТНЫХ ПЛАТЕЖЕЙ

Научная статья

Резавов Х.Ю.<sup>1,\*</sup>, Команов П.А.<sup>2</sup>, Тавасиев Д.А.<sup>3</sup>, Семиков В.С.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>ORCID: 0000-0002-3358-6197;

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», Санкт-Петербург, Россия

\* Корреспондирующий автор (xetag\_97[at]mail.ru)

### Аннотация

В статье будет предложена новая методика для обеспечения безопасности бесконтактных платежей. Новая методика значительно повышает безопасность бесконтактных платежей смартфонов с поддержкой NFC и банковских карт с аналогичным чипом. Были выявлены актуальные угрозы в системе бесконтактной оплаты. Проводится анализ защищенности системы бесконтактных платежей и на основе выявленных угроз безопасности разрабатываются рекомендации по их устранению и повышению уровня безопасности использования бесконтактных платежей.

**Ключевые слова:** бесконтактные платежи, угрозы, риски.

## CONTACTLESS PAYMENTS SECURITY RESEARCH

Research article

Revazov H.Yu.<sup>1,\*</sup>, Komanov P.A.<sup>2</sup>, Tavasiev D.A.<sup>3</sup>, Semikov V.S.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>ORCID: 0000-0002-3358-6197;

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education, ITMO University, St. Petersburg, Russia

\* Corresponding author (xetag\_97[at]mail.ru)

### Abstract

The article describes a new technique for ensuring the security of contactless payments. The new method significantly improves the contactless payment security with NFC-enabled smartphones and bank cards with a similar chip. The authors identified relevant threats in the contactless payment system, they conducted analysis of the security of the contactless payment system, and based on the identified security threats, developed recommendations to address them and increase the level of security with the use of contactless payments.

**Keywords:** contactless payments, threats, risks.

### Введение

Оплата «в одно касание» происходит с использованием технологии NFC (Near Field Communication) при помощи специальной банковской карты или смартфона, которые в свою очередь обеспечивают поддержку бесконтактной оплаты. Банки и производители электроники, которые осуществляют поддержку бесконтактных платежей, уверяют, что платежи являются безопасными, и делают акцент на простом и быстром механизме оплаты. При использовании такого способа оплаты легко убедиться в легкости использования и скорости свершения операций, однако в безопасности использования такого механизма оплаты стоит разобраться.

### Основные угрозы при использовании NFC-платежей

Не смотря на то, что при обмене информацией между картой или смартфоном в режиме эмуляции карты и ридером применяется шифрование, часть информации остается открытой. К тому же информация, которую хранит карта, так же не вся зашифрована. Злоумышленник может прослушивать эфир во время проведения транзакций по бесконтактной карте для выявления необходимой информации или же считать информацию с самой банковской карты. Данный вид угрозы представляет собой подслушивание информации.

Стандарт EMV допускает хранение конкретных данных в незашифрованном виде в памяти чипа карты. К таким сведениям могут иметь отношение номер карты, несколько последних совершенных операций и так далее. Какие именно данные находятся в открытом виде на карте определяет банк-эмитент, а также платежная система. Подобные данные, возможно, считать с помощью любого прибора, работающего в режиме ридера, к примеру, NFC-телефона, установив в него полностью легальное приложение.

Считается, что такого рода открытая информация не ставит под угрозу безопасность карты. Однако проведенное экспертами тестирование десяти различных бесконтактных карт, с использованием доступного NFC-ридера и бесплатного ПО показало, что существует возможность декодировать номер и дату истечения срока действия для всех десяти карт. Полученные данные в дальнейшем можно использовались для совершения покупок в интернет-магазинах.

Как было заявлено прежде, рабочая дальность для передачи данных по NFC является несколько см (вплоть до Десяти), что уже предоставляет возможность считывания данных и денежных средств посредством не металлизированные материалы. Однако ученые с британского Института Суррей показали возможность считывания по NFC сведений на расстоянии вплоть до 80 см с поддержкой компактного нестандартного ридера, который функционирует на огромной дистанции по той же технологии. Подобный прибор вполне способен неприметно «опрашивать» бесконтактные карты в общественном транспорте, торговых центрах, аэропортах и иных местах скопления людей. Так же с помощью подобного прибора, возможно, реализовывать подслушивание передаваемых сведений в транзакциях.

Мошенники найдут способы установить вредоносное ПО на мобильное устройство путем фишинга / социальной инженерии, чтобы жертва открыла вредоносное приложение в электронном письме и перенаправила пользователя на злонамеренный URL.

Существует также возможность атаки на спуфинг сети, т.е., когда злоумышленник настраивает поддельную точку доступа с тем же именем сети, что и та, которая уже существует, напр., популярное имя кафе. Они могут настроить поддельный веб-сайт для «аутентификации» пользователей и т.о. собирать данные, а затем могут использовать эти данные для следующих шагов в своей атаке. Нередко можно увидеть, что многие люди используют одинаковое имя пользователя и пароль для нескольких разных сервисов, даже для мобильного платежного приложения.

Возможна реализация, так называемой, атаки человек посередине. Предположим, что А и В используют активный и пассивный режим работы NFC соответственно. А генерирует ВЧ-поля и отправляет данные В. Если злоумышленник (Е) находится на достаточном расстоянии, то он может подслушивать и модифицировать данные, посланные А. При этом А и В не должны быть осведомлены о том, что они разговаривают не друг с другом и принимают и передают данные через Е. Е должна активно мешать передаче А, чтобы убедиться, что В не получает данных. Обладая необходимыми знаниями и оборудованием реализация такой атаки осуществима.

В случае кражи телефона возможна реализация еще одного способа доступа к использованию денежных средств пользователя. Получив мобильное NFC-устройство, злоумышленник может получить права суперпользователя, подключив это устройство к другому, таким образом, получить всю необходимую информацию и использовать ее для осуществления нелегитимных транзакций.

Не стоит так же забывать, что всегда существует угроза ошибки в программном коде. Угрозы данного типа позволяют получать информацию о платежной информации или позволяющую совершать транзакции из-за ошибок в коде приложения, неверной реализации кода, несоответствия ТЗ и других ошибок, вызванных вследствие недочетов в реализации приложения или же операционной системы.

Пример реализации такой угрозы был представлен командой британских исследователей из Университета Ньюкасла, которая сообщила, что обнаружила брешь в защите бесконтактных транзакций платежной системы VISA. Если запросить платеж не в фунтах стерлингов, а в иностранной валюте, то пороговое ограничение не срабатывает. А если платежный терминал не подключен к Интернету, то максимальная сумма мошеннической транзакции может составить до миллиона евро.

Для нейтрализации или существенного снижения воздействия на NFC-систему с использованием перечисленных угроз были выработаны следующие рекомендации по повышению уровня безопасности использования бесконтактной оплаты, которые разбиты по соответствующим угрозам.

Подслушивание:

- Установка безопасного канала связи.

Воздействие на устройство:

- Использование экранированного кошелька или подобных защитных металлических экранов для бесконтактной карты, в случае отсутствия такого метода защиты хранение NFC карт более чем в 10 см от «внешней» среды.

- Отказ от прав суперпользователя и использование проверенных антивирусных средств на мобильном телефоне.

- Отдельное хранение смартфона и бесконтактной карты.

Атака человек посередине:

- Поддержка терминалом механизма проверки радиочастотных полей во время передачи данных.

Кража устройства:

- Использовать пароль для разблокировки мобильного телефона (или биометрические данные);
- Установить пароль для входа в мобильное приложение;
- Использовать пароль для совершения платежной операции через мобильное приложение (или биометрические данные);

- Не объединять несколько банковских карт в одну виртуальную;

- Предусмотреть веб-сервис для блокировки мобильного приложения в случае утери/кражи;

- Использование ПО с защитой от несанкционированного вмешательства или взломостойкостью.

**Заключение**

Для снижения или исключения вероятности успешного использования выявленных уязвимостей и реализации угроз безопасности злоумышленниками, были выработаны рекомендации на основе изученных данных. Применение рекомендаций поставщиками услуг и пользователями системы бесконтактной оплаты повышает безопасность использования бесконтактных платежей. С учетом данных рекомендаций, система бесконтактных платежей становится не только быстрым и простым способом оплаты товаров и услуг, но и безопасным для использования в повседневной жизни.

**Конфликт интересов**

Не указан.

**Conflict of Interest**

None declared.

**Список литературы / References**

1. Security of Mobile Payments and Digital Wallets/ ENISA. – 2016.
2. Сайт лаборатории Касперского [Электронный ресурс] – URL: <https://www.kaspersky.ru/blog/contactless-payments-security/8608/> – (дата обращения 07.09.2019)
3. Papathanasiou C. DEF CON 18 “This is not the droid you’re looking for...”/ C.Papathanasiou, N. Percoco// Trustwave SpiderLabs– 2010.
4. Davis M. Hacking exposed malware and Rootkits (1 ed.) / Davis M. Sean Bodmer, Aaron LeMasters // McGraw-Hill, Inc., New York, NY, USA – 2009
5. The Great Bank Robbery: Carbanak APT [Electronic resource] – URL:<https://business.kaspersky.com/the-great-bank-robbery-carbanak-apt/3598/> – (accessed 10.09.2019)
6. Trend Micro Discovers MalumPoS; Malware Targeting Hotels and other US Industries [Electronic resource] – URL: <http://blog.trendmicro.com/trendlabs-security-intelligence/trend-micro-discovers-malumpos-targets-hotels-and-other-us-industries/> – (accessed 10.09.2019)
7. Killer C. University of Zürich, “An Off-the-shelf Relay Attack in a Contactless Payment Solution” / Killer C., Christos Tsiaras, Burkhard Stiller, – 2015.
8. Методика определения угроз безопасности информации в информационных системах [Электронный ресурс] / ФСТЭК России. – 2015. - URL: <http://fstec.ru/component/attachments/download/812> (дата обращения 07.09.2019)
9. Бондаренко Р. Технология NFC — связь на близком расстоянии [Электронный ресурс] / Р.Бондаренко. – 2011. - URL: <http://www.russianelectronics.ru/leader-r/review/2187/doc/57689/>, свободный. (дата обращения 07.09.2019)
10. Голдовский, И.М. Банковские микропроцессорные карты / И.М. Голдовский. – М.: ЦИПСИР: Альпина Паблишер, 2016. – 678с.

**Список литературы на английском языке / References in English**

1. Security of Mobile Payments and Digital Wallets/ ENISA. – 2016.
2. Kaspersky Lab website [Electronic resource] – URL: <https://www.kaspersky.ru/blog/contactless-payments-security/8608/> (accesses: 07.09.2019) [in Russian]
3. Papathanasiou C. DEF CON 18 “This is not the droid you’re looking for...”/ C. Papathanasiou, N. Percoco // Trustwave SpiderLabs – 2010.
4. Davis M Hacking exposed malware and Rootkits (1 ed.) / Davis M, Sean Bodmer, Aaron LeMasters. McGraw-Hill, Inc., New York, NY, USA – 2009
5. The Great Bank Robbery: Carbanak APT [Electronic resource] – URL: <https://business.kaspersky.com/the-great-bank-robbery-carbanak-apt/3598/> – (accessed:10.09.2019)
6. Trend Micro Discovers MalumPoS; Malware Targeting Hotels and other US Industries [Electronic Resource] – URL: <http://blog.trendmicro.com/trendlabs-security-intelligence/trend-micro-discovers-malumpos-targets-hotels-and-other-us-industries/> – (accessed: 10.09.2019)
7. Killer C. University of Zürich, “An Off-the-shelf Relay Attack in a Contactless Payment Solution” / Killer C., Christos Tsiaras, Burkhard Stiller – 2015.
8. Metodika opredeleniya ugroz bezopasnosti informatsii v informatsionnykh sistemakh [Methodology for identifying threats to information security in information systems] [Electronic resource] / FSTEC of Russia. – 2015. – URL: <http://fstec.ru/component/attachments/download/812> (accesses: 07.09.2019) [in Russian]
9. Bondarenko R. Tekhnologiya NFC — svyaz' na blizkom rasstoyanii [NFC technology – short-range communication] [Electronic resource] / R. Bondarenko. – 2011. – URL: <http://www.russianelectronics.ru/leader-r/review/2187/doc/57689/> (accesses: 07.09.2019) [in Russian]
10. Goldovsky I.M. Bankovskiye mikroprotsessornyye karty [Bank microprocessor cards] / I.M. Goldovsky. - M.: TsIPSiR: Alpina Publisher, 2016. – 678 p. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.90.12.020>

## ОСНОВНЫЕ ПРИСПОСОБЛЕНИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СБОРКИ – СВАРКИ БАКОВ

Научная статья

**Сотников Д.Н.<sup>1,\*</sup>, Котловцева Е.Ю.<sup>2</sup>, Корнеев П.С.<sup>3</sup>**  
<sup>1,2,3</sup> Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

\* Корреспондирующий автор (dmitrysotn[at]gmail.com)

### Аннотация

В статье приводятся основные этапы сборки – сварки бака большой длины, имеющего нестандартную форму. Решены основные технологические проблемы сварки в недоступных местах. Спроектированы 3D – модели приспособлений и описаны их основные элементы. Подробно рассмотрена сварка роботизированным комплексом и выбраны конкретные сварочные роботы, геометрические параметры которых являются универсальными и подходящими для работы с большинством изделий. Выбраны основные типы сварки различных элементов силового набора бака.

**Ключевые слова:** сборка – сварка, приспособление, стапель, роботизированный сварочный комплекс.

## MAIN DEVICES AND EQUIPMENT FOR AUTOMATED ASSEMBLY – TANK WELDINGS

Research article

**Sotnikov D.N.<sup>1,\*</sup>, Kotlovtseva E.Yu.<sup>2</sup>, Korneev P.S.<sup>3</sup>**  
<sup>1,2,3</sup> Orenburg State University, Orenburg, Russia

\* Corresponding author (dmitrysotn[at]gmail.com)

### Abstract

The article describes the main stages of assembly – welding of a tank of large length, which has a non-standard shape. The main technological problems of welding in inaccessible places were solved. 3D-models of devices are made, their basic elements are described in the paper. Welding by a robotic complex is considered in detail, and specific welding robots are selected, their geometric parameters are universal and suitable for working with most of the products. The main types of welding of various elements of the power set of the tank are selected.

**Keywords:** assembly – welding, fixture, slipway, robotic welding complex.

### Введение

Цель автоматизации сварочных процессов – получение сварных соединений с требуемыми свойствами при наилучших технико-экономических показателях без непосредственного участия человека. Автоматизация сварочных процессов, при которой повышается точность управления и контроля, а также исключается влияние на технологический процесс субъективных факторов (мастерство рабочего, его утомляемость и т. п.), направлена прежде всего на повышение качества сварных соединений и его стабилизацию в пределах партии однотипных изделий.

### Приспособления для сборки – сварки баков

Сборка – сварка отсеков бака выполняется в сборочном – сварочном приспособлении. Это вызвано требованиями точности и взаимозаменяемости изделий как по внешним обводам, так и по стыковым поверхностям. Приспособление состоит из шести одинаковых стапелей (отличаются только расположением фиксатора обшивки), способных сдвигаться друг к другу по роликовым направляющим, рисунок 1. Каждый стапель представляет собой пространственную конструкцию, изображенную на рисунке 2, состоящую из:

- ложементов
- рубильников;
- балок;
- роликовых кареток;
- прижимов и фиксаторов;
- механизма подъема рубильников;
- вилок крепления рубильников
- петель.



Рис. 1 – Приспособление для сборки – сварки

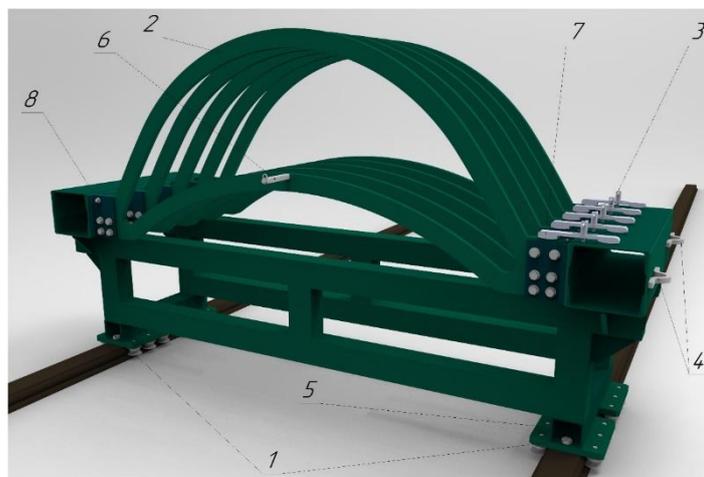


Рис. 2 – Стапель приспособления:

1 – болты – фиксаторы; 2 – рубильник; 3 – прижимы; 4 – петли; 5 – каретка с роликами; 6 – фиксатор обечайки; 7 – вилка крепления; 8 – ось подъема рубильника

Контур рубильников повторяет теоретический контур баков. Сборка приспособления производится с помощью оптических средств. Практически вся конструкция приспособления сварная.

Бак имеет неправильную форму и вследствие этого невозможно будет осуществить сварку на одном приспособлении. Стапель имеет так называемые «мертвые» зоны, помеченные на рисунке 3. В этих местах невозможно осуществить контактно – точечную сварку, вследствие чего было принято решение спроектировать площадку, изображенную на рисунке 4. Она дает возможность осуществить роботизированную контактно – точечную сварку в «мертвых» местах. Вертикальное приспособление представляет собой пространственную конструкцию, состоящую из:

- основания, с вырезом для вертикального расположения бака;
- ножек;
- прижимов.

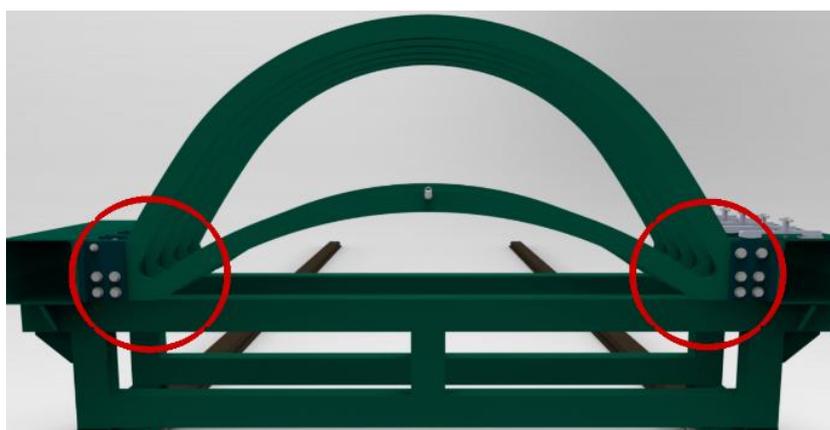


Рис. 3 – «Мертвые» зоны стапеля для сборки – сварки

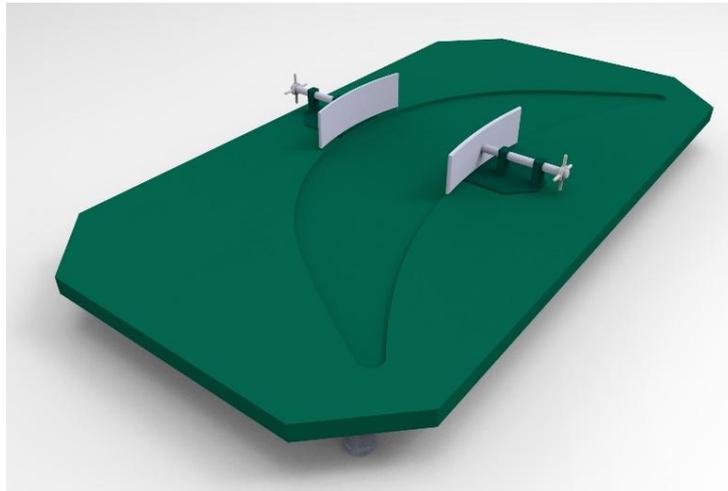


Рис. 4 – Площадка для вертикальной сварки

#### Оборудование для сварки отсеков бака

Так как отсеки бака аналогичны друг другу то их сборка – сварка будет происходить по одинаковому принципу. Сварка будет производиться роботизированным сварочным комплексом (РТК). В процессе изготовления отсеков бака будут использоваться два вида сварки – это контактно – точечная и электродуговая.

Электродуговая сварка будет осуществляться универсальным сварочным роботом Kawasaki RS015X, рисунок 5. С помощью данного робота будет происходить сварка продольных и поперечных швов. Промышленные роботы Kawasaki серии R созданы специально для электродуговых сварочных работ. Kawasaki RS015X имеет длительный срок службы, отличается эргономичным дизайном и высочайшими показателями точности выполнения требуемых задач. Увеличенный радиус действия расширяет возможности применения роботов в различных областях промышленности. Главным критерием при выборе данного робота является большая досягаемость, что является весьма важным фактором при сварке баков крупных габаритов, рисунок 6.

Основные характеристики Kawasaki RS015X:

- специализация: универсальный, сварочный для дуговой сварки;
- количество осей робота 6;
- досягаемость 3150 мм;
- грузоподъемность 15 кг;
- точность 0,15 мм;
- вес манипулятора 545 кг;
- страна-производитель: Япония.



Рис. 5 – Промышленный робот Kawasaki RS015X

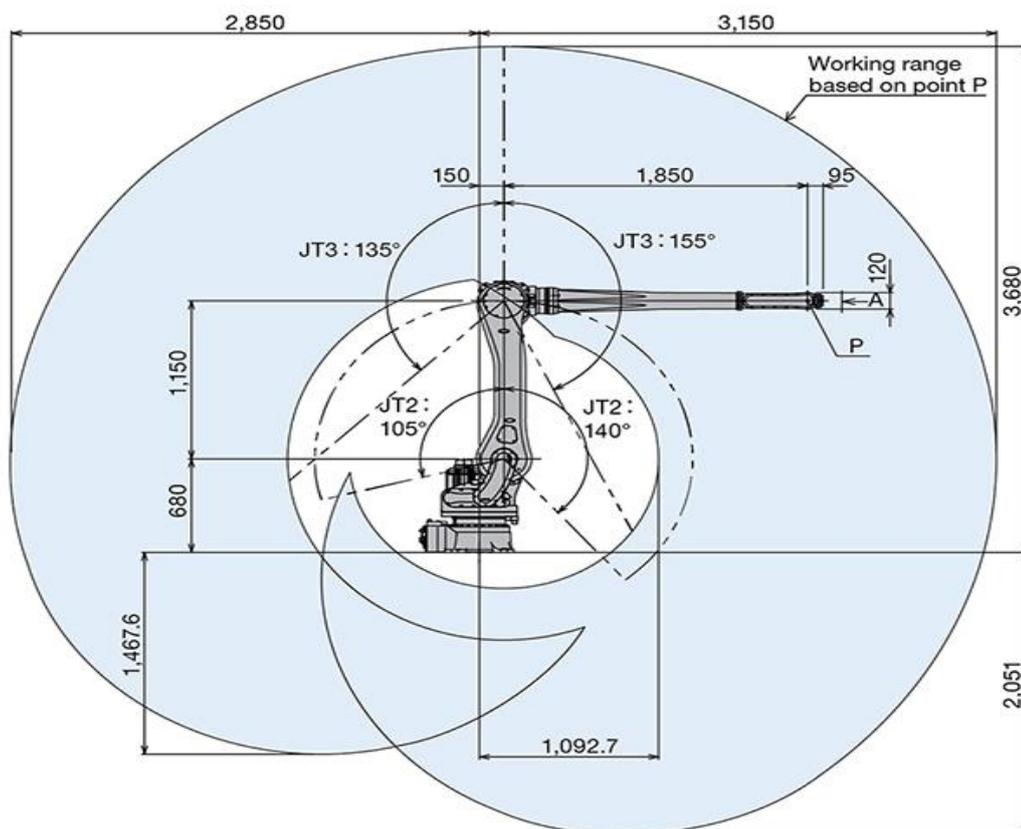


Рис. 6 – Размеры и диапазоны движения Kawasaki RS015X

Контактно – точечная сварка предназначена для соединения поперечного и продольного силового набора с обшивкой. Данная операция будет осуществляться промышленным роботом Kawasaki VX200X, рисунок 7. Робот оснащен высокопроизводительными двигателями с высокой частотой вращения и использует новейшие технологии антивибрационного контроля. Это позволяет существенно сократить время сварки. Модель имеет компактные размеры и дружелюбный дизайн с двумя информационными экранами. Клещи для точечной сварки данных баков должны иметь большой вылет электродов и достаточную силу сжатия, вследствие чего их масса будет большой. Данный робот имеет достаточную грузоподъемность, что решает вышесказанную проблему. Одним из главных критериев при выборе данного робота является его большая досягаемость, рисунок 8. Данный промышленный робот имеет отдельный (вне исполнительного устройства и манипулятора) источник сварочного тока. Такая схема имеет очевидные преимущества: сварочные клещи такого робота не содержат трансформатора, вследствие чего снижается их масса, что приводит к снижению нагрузок на оси, повышению точности позиционирования и скорости линейных перемещений. Недостаток: увеличение габаритов сварочного контура и установочной мощности силового оборудования.

Основные характеристики Kawasaki VX200X:

- количество осей робота: 6;
- досягаемость 3412 мм;
- грузоподъемность 200 кг;
- точность 0,07 мм;
- вес манипулятора 1450 кг;
- страна-производитель: Япония.



Рис. 7 – Промышленный робот Kawasaki BX200X

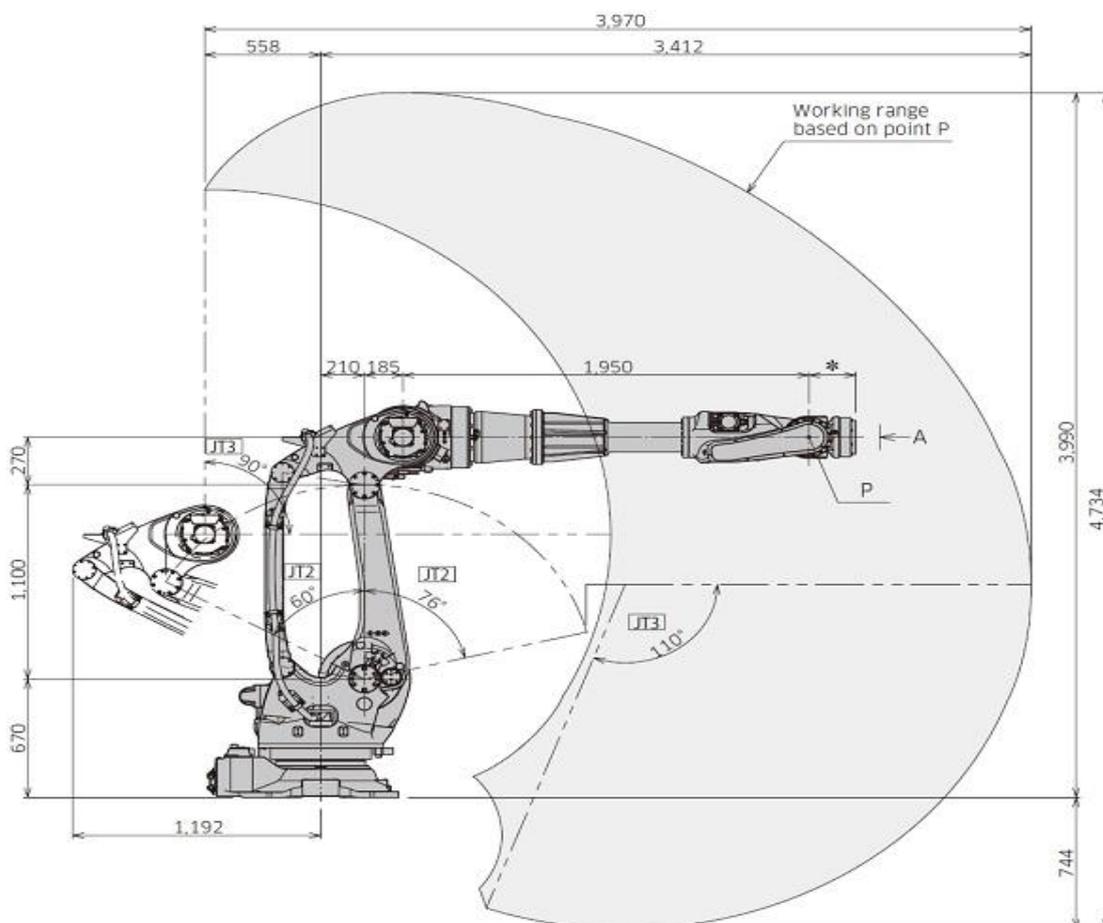


Рис. 8 – Размеры и диапазоны движения Kawasaki BX200X

В качестве сварочных клещей будут использованы X – образные клещи DeltaSpot, рисунок 9. В сварочных клещах DeltaSpot используется подвижная контактная лента. Контактная лента обеспечивает защиту поверхности сварочных электродов и повторяемость процесса.

Основные характеристики клещей DeltaSpot X800;

- вылет электродов 800 мм;
- максимально давление электродов 3 кН;
- масса 125 кг.



Рис. 9 – Роботизированные клещи для контактной – точечной сварки DeltaSpot X800

### Основные этапы сварки бака

Сварка бака осуществляется в следующей последовательности:

1) Осуществляется контактно – точечная сварка, сначала продольного затем поперечного силового набора, рисунок 10.

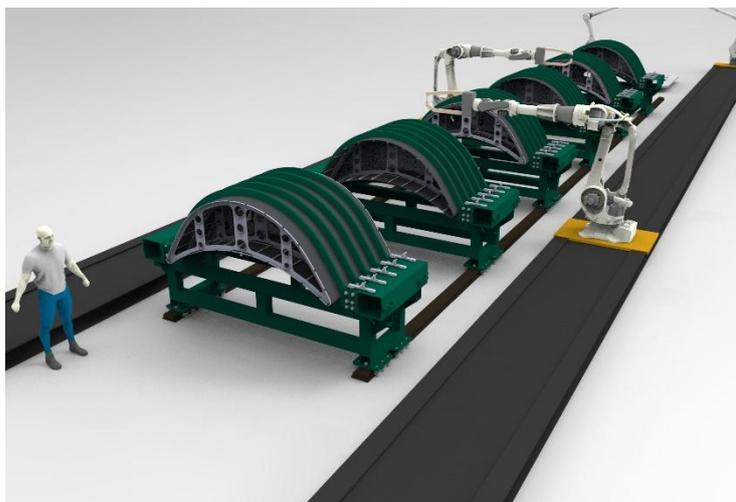


Рис. 10 – Контактнo-точечная сварка продольного и поперечного силового набора

2) Выполняется электродуговая сварка продольных швов каждого отсека, рисунок 11.

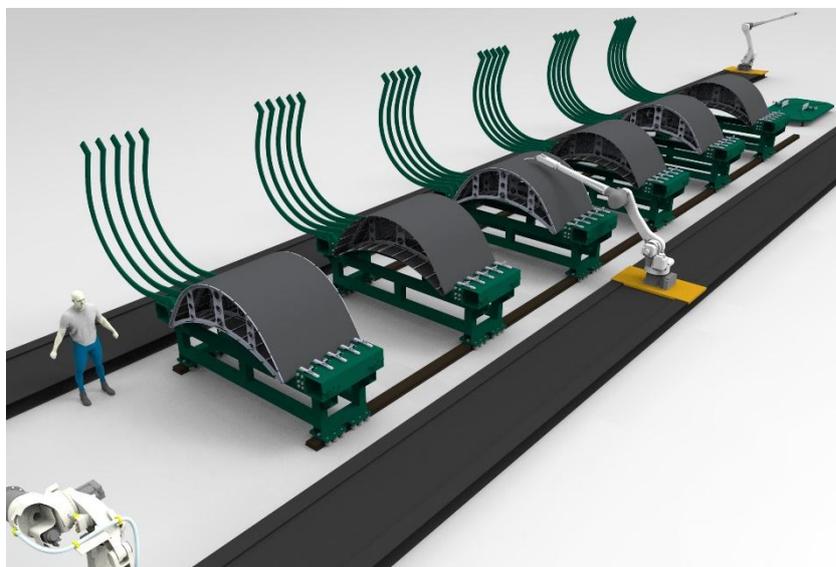


Рис. 11 – Сварка продольных швов

3) Производится контактно-точечная сварка в «мертвых» зонах на вертикальной площадке для вертикальной сварки, рисунок 12

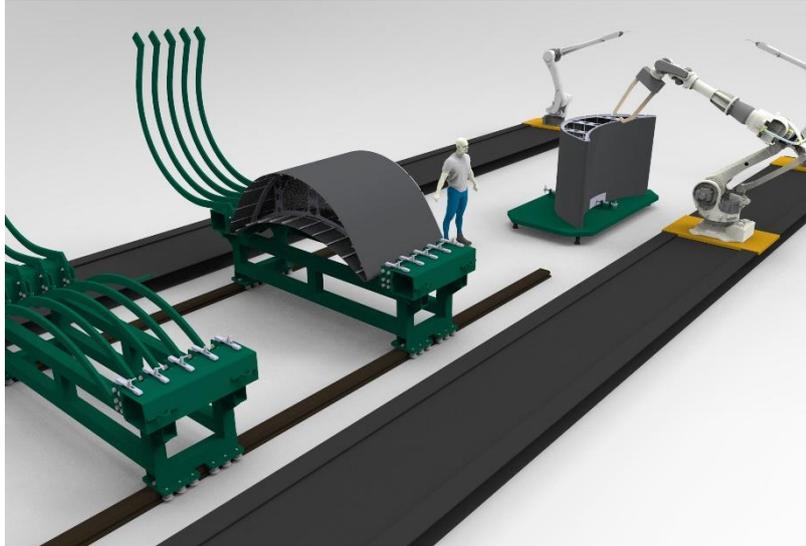


Рис. 12 – Сварка в «мертвых» зонах

4) Совершается дуговая сварка поперечных швов, рисунок 13.

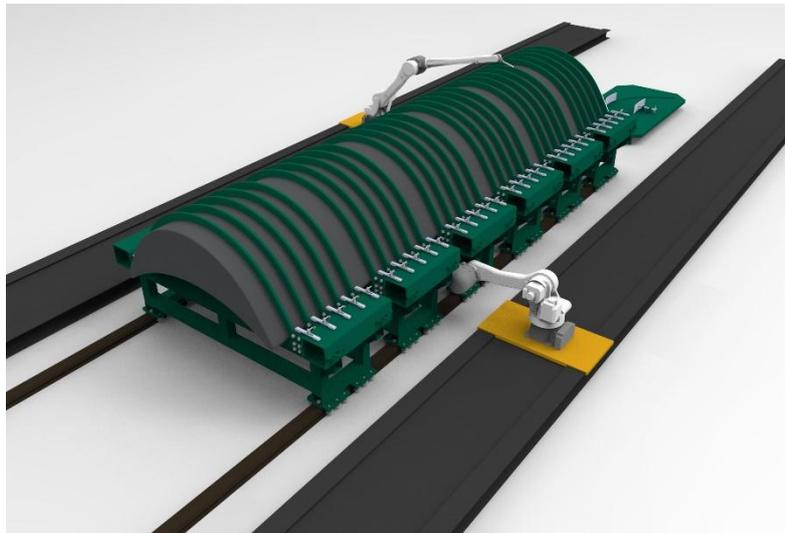


Рис. 13 – Сварка поперечных швов

#### Заключение

Роботизация сварочных работ способна в несколько раз повысить эффективность производства. Применение сварочных роботов, выступающих в роли ключевого элемента гибкого автоматизированного производства, позволяет обеспечить высокое качество сварных соединений, снизить процент брака, избавить человека от монотонного труда. Роботизация сварки позволяет добиться значительной экономии сварочных материалов и электроэнергии, уменьшения сварочных деформаций. Она открывает возможность вести производство на меньшей площади, не требуя значительных затрат (неизбежных при ручной сварке) на мероприятия по охране труда и на оплату труда сварщиков-профессионалов. Хотя стоимость сварочных роботов относительно высока, но вложения окупаются достаточно быстро. Весьма важны также достигаемые в условиях роботизированного производства сокращение времени изготовления продукции и обеспечение идентичности готовой продукции. Вместе с тем роботизация сварки влечёт расходы на обучение персонала, который программирует и обслуживает роботы, предъявляя жёсткие требования к сборке и позиционированию свариваемых заготовок.

#### Конфликт интересов

Не указан.

#### Conflict of Interest

None declared.

#### Список литературы / References

1. Байков А.А. Влияние использования криогенного топлива на облик магистрального самолета: 05.07.02 / Байков А.А.: Москва, 2004 157 с. РГБ ОД, 61:05-5/1913.
2. Горбацевич А.Ф. Курсовое проектирование по технологии машиностроения: Учебное пособие для вузов / А.Ф. Горбацевич, В.А. Шкред. - М.: Альянс, 2015. - 256 с.

3. Кузьмин В. В. Математическое моделирование технологических процессов сборки и механической обработки изделий машиностроения / В.В. Кузьмин, А.Г. Схиртладзе. - М.: Высшая школа, 2008. - 280 с.
4. Федоткин И.М. Математическое моделирование технологических процессов / И.М. Федоткин. - М.: Либроком, 2011. - 936 с.
5. Кочергин К.А. Контактная сварка / К.А. Кочергин. - М.: Главная редакция литературы по машиностроению и металлообработке, 2017. - 104 с.
6. Аргоно-дуговая сварка алюминиевых сплавов для строительных конструкций. - М.: ЁЁ Медиа, 2017. - 598 с.
7. Поплавко М. Сварка в самолетостроении / М. Поплавко. - М.: ЁЁ Медиа, 2017. - 988 с.
8. Рыкалин, Н. Н. Расчёты тепловых процессов при сварке / Н.Н. Рыкалин. - М.: ЁЁ Медиа, 2017. - 116 с.
9. Ахатов Р.Х. Современные методы и средства монтажа сборочной оснастки: учебно-методическое пособие / Р.Х. Ахатов, А.С. Говорков – Иркутск: Изд-во НИ ИргТУ, 2011, 76 с.

**Список литературы на английском языке / References in English**

1. Baykov A.A. Vliyaniye ispol'zovaniya kriogenogo topliva na oblik magistral'nogo samoleta: 05.07.02 [The effect of the use of cryogenic fuel on the appearance of the main aircraft: 07/05/02:] / Baykov A.A. Moscow, 2004 - 157 p. RSL OD, 61: 05-5 / 1913. [in Russian]
2. Gorbatshevich, A.F. Kursovoe proektirovanie po tekhnologii mashinostroeniya: Uchebnoe posobie dlya vuzov [Course design on mechanical engineering technology: Textbook for universities] / A.F. Gorbatshevich, V.A. Shkred. - М.: Alliance, 2015. - 256 p. [in Russian]
3. Kuzmin, V.V. Matematicheskoe modelirovanie tekhnologicheskikh processov sborki i mekhanicheskoy obrabotki izdelij mashinostroeniya [Mathematical modeling of technological processes of assembly and machining of engineering products] / V.V. Kuzmin, A.G. Shirladze. - М.: Higher School, 2008. - 280 p [in Russian]
4. Fedotkin I.M. Matematicheskoe modelirovanie tekhnologicheskikh processov [Mathematical modeling of technological processes] / I.M. Fedotkin. - М.: Librocom, 2011 - 936 p. [in Russian]
5. Kochergin K.A. Kontaktnaya svarka [Resistance welding] / K.A. Kochergin. - М.: The main edition of the literature on mechanical engineering and metalworking, 2017. - 104 p. [in Russian]
6. Argono-dugovaya svarka alyuminievykh splavov dlya stroitel'nykh konstrukcij [Argon-arc welding of aluminum alloys for building structures]. - М.: YOЕ Media, 2017 - 598 p. [in Russian]
7. Float M. Svarka v samoletostroenii [Welding in aircraft construction] / M. Float. - М.: YOЕ Media, 2017 - 988 p [in Russian]
8. Rykalin N. N. Raschyoty teplovykh processov pri svarke [Calculation of thermal processes during welding] / N.N. Rykalin. - М.: YOЕ Media, 2017 - 116 p. [in Russian]
9. Akhatov R.Kh. Sovremennye metody i sredstva montazha sborochnoj osnastki: uchebno-metodicheskoe posobie [Modern methods and means of assembling assembly equipment: teaching aid] / R.Kh. Akhatov, A.S. Govorkov - Irkutsk: Publishing House of NI ISTU, 2011, 76 p. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.90.12.021>

## ВЛИЯНИЕ ГЕНОТИПИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ЗЕРНА ПШЕНИЦЫ НА СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРОДУКТОВ ЕГО РАЗМОЛА

Научная статья

Медведев П.В.<sup>1</sup>, Федотов В.А.<sup>2,\*</sup>, Владимиров Н.П.<sup>3</sup>

<sup>2</sup>ORCID: 0000-0002-3692-9722;

<sup>1,2,3</sup> Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

\* Корреспондирующий автор (vital\_asm[at]mail.ru)

### Аннотация

В статье дана сравнительная характеристика оценки структурно-механических свойств зерна пшеницы на основе гранулометрического анализа продуктов размола зерна. Наиболее распространенный показатель этих свойств - показатель твердозерности, который оценивался: по проходу определенного сита, а также расширенным гранулометрическим - фрактографическим методом, позволяющим с помощью «компьютерного зрения» учитывать не только размеры частиц, но и их форму. Проведено исследование влияния способа размола на точность оценки твердозерности зерна.

**Ключевые слова:** твердозерность, зерно пшеницы, вальцовые установки, размол зерна, гранулометрический анализ.

## INFLUENCE OF GENOTYPIC WHEAT GRAIN FACTORS ON STRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF ITS MILLING PRODUCTS

Research article

Medvedev P.V.<sup>1</sup>, Fedotov V.A.<sup>2,\*</sup>, Vladimirov N. P.<sup>3</sup>

<sup>2</sup>ORCID: 0000-0002-3692-9722;

<sup>1,2,3</sup> Orenburg State University, Orenburg, Russia

\* Corresponding author (vital\_asm[at]mail.ru)

### Abstract

The article presents a comparative description of the structural and mechanical properties of wheat grain based on particle size analysis of grain grinding products. The most common indicator of these properties is the hardness index, which was evaluated: by the passage of a certain sieve, as well as by the advanced particle size distribution – fractographic method, which allows using "computer vision" to take into account not only the particle size, but also their shape. A study was made of the influence of the grinding method on the accuracy of assessing grain hardness.

**Keywords:** hardness, wheat grain, roller plants, grain grinding, particle size analysis.

### Введение

Биологические системы, частным случаем которых является зерно пшеницы, представляют собой сложные многокомпонентные структуры, в которых показатели качества характеризуются высокой лабильностью, зависимостью от генотипических и агроэкологических факторов, что определяет необходимость их контроля и учета при выборе оптимальных технологических режимов на каждом этапе процесса переработки зерна.

Как известно, основной вклад в формирование качества зерна и продуктов его переработки вносят генотипические и агроэкологические факторы. Однако, сведения об их совместном влиянии разрозненны, что связано с несовершенством методик их определения, сложностями в интерпретации степени влияния факторов на качество сырья, полуфабрикатов и готовой продукции.

Показатель твердозерности зерна является в большей степени генетически закрепленной характеристикой пшеницы, наиболее устойчивым к влиянию агроэкологических факторов, предположительно, может быть использован в качестве объективного критерия оценки физико-химических показателей пшеницы [1], [2], [3].

Твердозерность как показатель структурно-механических свойств зерна проявляется и может быть измерена в процессе измельчения. Измельчение зерна и зернопродуктов на мукомольных заводах - одна из ведущих технологических операций в процессе производства муки и крупы. От эффективности процесса измельчения зависят качество и выход готовой продукции, энергоёмкость технологического процесса и основные экономические показатели предприятия. Главная измельчающая машина на современном мукомольном заводе - вальцовый станок. Устройство основных узлов различных вальцовых станков в основном одинаково, отличаются только конструкции отдельных узлов. Перспективным является разработка методов экспрессного анализа показателя твердозерности зерна на начальных стадиях его переработки [4].

### Материалы и методы исследования

Материалом исследований служило зерно 13-ти сортов пшеницы Оренбургской области урожая трех природно-климатических зон (восточная, центральная, западная) за 10 лет испытаний (2009 - 2018 гг.). Изучали твердую пшеницу шести сортов: Оренбургская 10, Безенчукская 200, Оренбургская 21, Безенчукская янтарь, Харьковская 3, Степь 3 и мягкую пшеницу семи сортов: Саратовская 42, Учитель, Оренбургская 13, Юго-восточная 3, Варяг, Прохоровка, Л-503. Исследованные сорта – в настоящее время лидеры посевов в Оренбургской области, на их долю приходится до 80 % площади сельскохозяйственных угодий, отведённых под посев пшеницы в этом регионе.

При переработке зерна пользовались различными методами измельчения. Помолы проводили в соответствии с «Правилами организации и ведения технологического процесса на мукомольных заводах». Перед размолом зерно было увлажнено до рекомендуемых значений влажности, в зависимости от начальной влажности сырья [5].

Методы определения твердозерности зерна включали в себя различные методики ситового анализа продуктов его помола, косвенно характеризующие степень твердозерности зерна. Кроме того, для сравнения, использовали прямой метод оценки твердозерности по усредненным значениям микротвердости зерновки [6].

Твердозерность оценивали следующими методами:

- по показателю степени измельчения (ПСИ) согласно методики ВНИИЗ (проход через сито № 008, в %);
- по показателю индекса размера частиц (ИРЧ) согласно методики, предложенной Н.С. Беркутовой (проход через сито №0071, в %);
- по показателю микротвердости (по способности зерна сопротивляться вдавлению на микротвердомере ПМТ-3, в кг/мм<sup>2</sup>).

Диапазон значений микротвердости: для низкотвердозерного – менее 10 кг/мм<sup>2</sup>, среднетвердозерного – от 10 до 15 кг/мм<sup>2</sup>, высокотвердозерного – от 15 до 20 кг/мм<sup>2</sup>, сверхвысокотвердозерного – больше 20 кг/мм<sup>2</sup>.

Кроме того, для оценки твердозерности использовали алгоритмы современных информационных технологий. На сегодняшний день перспективным является повышение информативности гранулометрического анализа за счет использования современных интеллектуальных систем при цифровизации зерноперерабатывающей отрасли. Для исследования продуктов помола зерна пшеницы использовали расширенный гранулометрический – т.н. фрактографический анализ помола зерна, позволяющий учитывать не только линейные размеры частиц помола, но и их форму. Применение информационных технологий - технического (компьютерного) зрения для классификации частиц по форме и размеру позволило существенно снизить временные и трудозатраты, а также погрешность оценки [7].

Фрактографический анализ проводили на лабораторной установке, состоящей из цифровой камеры Sony IMX219 Exmor RS 8MP (CMOS) с восьмимегапиксельным сенсором, оснащенной для точного позиционирования относительно измельченного материала сервоприводами в синхронном исполнении. Обработку изображений микроснимков осуществляли миниатюрным одноплатным компьютером Raspberry Pi 3 Model B+ под управлением операционной системы Raspbian stretch (GNU/Linux 9.1). Для анализа изображений продуктов помола зерна было разработано программное обеспечение на основе OpenCV – библиотеки алгоритмов технического зрения. На первом этапе анализа частицы размолотого зерна определяют как отдельные объекты за счет программной обрисовки каждой замкнутым контуром. На выходе образуется массив проекций контуров частиц (фигур), у которых определяются их геометрические характеристики. Выделены наиболее значимые характеристики фигур. Из центров тяжести фигур алгоритмами технического зрения выделяется достаточное количество отрезков во все стороны, вычисляются средние значения длин (X) и коэффициенты их вариации (K) у каждой фигуры. При анализе выборки из большого количества частиц средние значения X и K в наибольшей степени характеризуют размер частиц и форму. [8]

#### **Результаты и их обсуждение**

Для установления влияния характера измельчения зерна на результаты определения твердозерности ситовым, фрактографическим и другими методами проводили помолы зерна пшеницы тремя разными мельничными установками. [9]

Первый вариант измельчения зерна представлял собой помол на лабораторной мельнице Nagema 812, производительностью от 350 до 900 кг/час. Данные баланса помола на данной установке свидетельствуют о ее высокой технологической эффективности.

Второй вариант измельчения зерна представлял собой помол на лабораторной вальцовой мельнице «Labor muszeripari muvek» венгерского производства.

Третий вариант измельчения зерна представлял собой упрощенный помол на миниатюрной лабораторной мельнице (например, мини-мельнице Novita), удовлетворяющей требованиям ГОСТ ISO 21415-2:2015 «Пшеничная и пшеничная мука. Содержание клейковины». Согласно требованиям ГОСТ процесс помола должен длиться от 30 до 40 секунд. При производстве муки таким способом получали 72 % первого сорта (или 60 % высшего сорта) муки и 28 % отрубей.

Поскольку интенсивность помола зерна на зерновой мини-мельнице определяется, в основном, лишь длительностью процесса, параллельно изучали влияние варьирования длительности помола в диапазоне от 20 до 80 секунд. Сравнительный анализ измерений твердозерности размалываемого зерна показал, что помол дольше 40 секунд не приводил к существенному расширению диапазона значений твердозерности. Поэтому продолжительность помола приняли за постоянную величину в 40 секунд.

Технологический процесс на вальцовых станках построен на использовании драных, шлифовочных и размольных систем. Вместе с постепенным измельчением зерна, на каждой системе отсеивают некоторое количество муки, выделяют промежуточные потоки, группирование и помол которых позволяет получить муку различную по качеству. Эти потоки можно объединить в один сорт или разделить на несколько сортов определенного качества. Промежуточные продукты разделяют по крупности на отдельные потоки на просеивающих машинах.

Отбор муки вели на отсевах (рассев лабораторный типа У1-ЕРЛ с частотой колебаний не менее 180 в мин) на ситах с различными размерами ячеек в течении 5 минут.

Опытным путем установили, что для одновременного достижения максимально высокого выхода муки и обеспечения получения требуемого сорта необходимо:

- для получения муки высшего сорта из продуктов помола зерна оптимально использовать сито №49/52 ПА;
- для получения муки первого сорта – сито № 45/50 ПА;
- для получения муки второго сорта – сито № 41/43 ПА.

Сортность полученных образцов муки была оценена по показателю белизны и крупности помола. Общепринят при оценке качества муки способ определения крупности помола по остатку и проходу через одно-два сита соответствующих размеров. Крупность помола устанавливали в соответствии с ГОСТ 27560-87 «Мука и отруби. Метод определения крупности».

Согласно ГОСТ 26574-2017 «Мука пшеничная хлебопекарная» мука первого сорта должна соответствовать проходу через сито из шелковой ткани № 43 не менее 80 %, проходу через сито из полиамидной ткани № 45/50 не менее 80 %. Мука второго сорта должна соответствовать проходу через сито из шелковой ткани № 38 не менее 65 %, проходу через сито из полиамидной ткани № 41/43 не менее 65 %. [10], [11], [12] Сравнивали результаты определения твердозерности по данным ситового и фрактографического анализа продуктов размола зерна, полученных измельчением тремя описанными методами. В качестве референтной методики определения твердозерности, использовали показатель микротвердости зерна (как прямой метод оценки твердозерности). Сравнение со значениями, полученными референтной методикой позволило оценить точность определения твердозерности (таблица 1).

Таблица 1 – Корреляционная матрица показателя твердозерности зерна, определенного гранулометрическими методами в сравнении с данными микротвердомера

Метод измельчения зерна	Лабораторная мельница Nagema (Германия)			Лабораторная мельница Labor muszeripari muvek (Венгрия)			Лабораторная зерновая мини-мельница Novital (Италия)	
	высший	первый	второй	высший	первый	второй	первый	второй
Сорт муки								
Твердозерность по ПСИ	0,89	0,85	0,82	0,87	0,84	0,81	0,82	0,78
Твердозерность по ИРЧ	0,84	0,87	0,80	0,80	0,84	0,72	0,79	0,75
Твердозерность по данным фрактографического анализа	0,96	0,95	0,92	0,91	0,90	0,85	0,87	0,81

Установили наличие статистически значимых связей между результатами изучаемых способов оценки твердозерности вне зависимости от метода помола зерна (лабораторными мельницами Nagema, Labor muszeripari muvek, Novital). В большей степени эти связи проявляются при измельчении зерна вальцовыми установками, чуть хуже – при помолах зерновой мини-мельницей. [13] В результате обработки большого количества экспериментальных данных получены регрессионные уравнения связи показателей фрактографического анализа продуктов размола зерна с твердозерностью этого зерна. Установлена предельная относительная погрешность определения твердозерности (по сравнению со значениями твердозерности, измеренной по микротвердости зерна) (таблица 2).

Таблица 2 – Связь твердозерности с данными гранулометрических анализов

Метод измельчения	Соответствие сорту	Данные фрактографического анализа		Предельная относительная погрешность определения твердозерности, %		
		Уравнение регрессии	Коэффициент детерминации	фрактографически	ПСИ	ИРЧ
лабораторная мельница Nagema (Германия)	высший	$TB = 0,15 \cdot \hat{E} + 0,28 \cdot \tilde{O} + 0,90$	0,92	2,4	4,5	5,9
	первый	$TB = 0,16 \cdot \hat{E} + 0,26 \cdot \tilde{O} + 0,89$	0,90	2,6	4,1	6,1
	второй	$TB = 0,16 \cdot \hat{E} + 0,28 \cdot \tilde{O} + 0,82$	0,84	2,9	4,0	6,4
лабораторная мельница Labor muszeripari muvek (Венгрия)	высший	$TB = 0,17 \cdot \hat{E} + 0,26 \cdot \tilde{O} + 0,84$	0,83	3,3	5,7	6,5
	первый	$TB = 0,15 \cdot \hat{E} + 0,25 \cdot \tilde{O} + 0,72$	0,81	3,1	5,9	6,9
	второй	$TB = 0,14 \cdot \hat{E} + 0,32 \cdot \tilde{O} + 0,89$	0,72	3,3	6,2	7,4
зерновая мини-мельница Novital (Италия)	первый	$TB = 0,15 \cdot \hat{E} + 0,27 \cdot \tilde{O} + 0,85$	0,76	3,3	7,1	7,5
	второй	$TB = 0,18 \cdot \hat{E} + 0,22 \cdot \tilde{O} + 0,71$	0,66	3,8	7,5	8,2

Полученные уравнения послужили основой фрактографического метода определения твердозерности зерна пшеницы (патент РФ № 2442132, свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ № 2011610605). Погрешность определения твердозерности при измельчении мельницей Nagema не превышает 2,4 %, мельницей Labor muszeripari muvek - 2,6 %, зерновой мини-мельницей Novital - 2,9 %.

Кроме того, данные фрактографического анализа также использовали для прогнозирования хлебопекарных качеств зерна пшеницы в процессе его помола (патент РФ № 2433398, свидетельство о госрегистрации программы для

ЭВМ № 2018660558). В качестве референтной методики оценки хлебопекарных свойств зерна и муки пользовались пробной лабораторной выпечкой, производимой двумя методами, характеризующимися существенными технологическими различиями – трехфазной по методике НИИХП и однофазной по методике ВНИИЗ.

Установлены статистически значимые зависимости объемного выхода хлеба, его формоустойчивости и балльной оценки качества от твердозерности вне зависимости от метода измельчения зерна (таблица 3).

#### Заключение

Таким образом, в ходе проведенных исследований изучены возможности использования гранулометрического (фрактографического) анализа продуктов размола зерна для оценки структурно-механических свойств зерна пшеницы (ее твердозерности). На основе сравнительного анализа экспериментальных данных показано, что твердозерность – достоверный и информативный показатель для прогнозирования хлебопекарных свойств зерна и муки вне зависимости от метода измельчения зерна.

Разработаны экспрессные способы определения физико-химических показателей качества продуктов размола зерна пшеницы на основе фрактографического анализа: определение твердозерности зерна с погрешностью не более 3 %, объемного выхода хлеба – не более 8 %, балльной оценки качества хлеба – не более 15 %, в сравнении с традиционными методами определения.

Таблица 3 – Предельная относительная погрешность оценки хлебопекарных свойств продуктов размола зерна по твердозерности, определенной фрактографическим анализом, %

Способ пробной лабораторной выпечки	Показатели	Метод измельчения зерна						
		Лабораторная мельница Nagema (Германия)			Лабораторная мельница Labor muszeripari muvek (Венгрия)		Лабораторная зерновая мини-мельница Novital (Италия)	
		высший сорт	первый сорт	второй сорт	первый сорт	второй сорт	первый сорт	второй сорт
трехфазный	Объемный выход, см <sup>3</sup> /100 г муки	8,1	8,2	7,8	8,9	8,2	10,2	12,3
	Формоустойчивость	10,2	10,8	10,4	9,5	10,1	15,8	16,7
	Балльная органолептическая оценка качества, балл	14,2	14,1	13,5	15,5	15,0	20,5	17,6
однофазный	Объемный выход, см <sup>3</sup> /100 г муки	8,8	8,5	8,9	9,0	9,8	13,8	17,5
	Формоустойчивость	12,5	14,4	13,8	13,8	14,9	19,5	22,2
	Балльная органолептическая оценка качества, балл	13,6	16,5	16,2	18,3	17,1	19,5	21,7

#### Конфликт интересов

Не указан.

#### Conflict of Interest

None declared.

#### Список литературы / References

1. Пищевая химия / Нечаев А. П., Траубенберг С. Е., Кочеткова А. А. и др. Под ред. А. П. Нечаева. – СПб.: ГИОРД, 2001. – 592 с.
2. Хангильдин В. В. Гомеостатичность и адаптивность сортов озимой пшеницы / В. В. Хангильдин, Н. А. Литвиненко // Науч.-техн. бюл. – 1981. – № 1. – С.8-14.
3. Медведев, П. В. Комплексная оценка потребительских свойств зерна и продуктов его переработки / П. В. Медведев, В. А. Федотов, И. А. Бочкарева // Международный научно-исследовательский журнал. - 2015. - № 7-1 (38). - С. 77-80.
4. Федотов В. А. Факторы формирования потребительских свойств зерномучных товаров / В. А. Федотов // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2011. – № 4. – С. 186-190.
5. Беркутова Н. С. Микроструктура пшеницы / Н. С. Беркутова, И. А. Швецова. - М.: Колос, 1977. - 122 с.
6. Федотов В. А. Информационно-измерительная система определения потребительских свойств пшеницы / Федотов В. А., Медведев П. В. // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2013. – № 3. – С. 140-145.

7. Тарасенко, Ф. П. Прикладной системный анализ (наука и искусство решения проблем): Учебник / Ф. П. Тарасенко. - Томск; Издательство Томского университета, 2004. – 128 с.
8. Регионы России: социально-экономические показатели. 2016: стат. сборник / Росстат. - М., 2016. - 995 с.
9. Медведев П. В. Информационно-измерительные системы управления потребительскими свойствами зерномучных товаров / П. В. Медведев, В. А. Федотов // Современные тенденции в экономике и управлении: новый взгляд : монография. – Оренбург: ООО «Агентство «Пресса», 2013. – С. 35-51.
10. Шепелев А. Ф. Товароведение и экспертиза электротоваров: учебное пособие для вузов / А. Ф. Шепелев, И. А. Печенежская. - Ростов-на-Дону: Феникс, 2002. - 192 с.
11. Медведев П.В. Управление качеством продуктов переработки зерна и зерномучных товаров / П. В. Медведев, В. А. Федотов, И. А. Бочкарева // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. - 2016. - № 1. - С. 61 – 69.
12. Потороко И.Ю. Современное состояние и тенденции развития хлебопекарной отрасли / И.Ю. Потороко, Н.В. Андросова // Сборник материалов XII Международной научно-практической конференции «Торгово-экономические проблемы регионального бизнес-пространства» – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2014. – С. 168–170.
13. Кипрушкина Е.И. Инновационные технологии производства и хранения растительной продукции / Е.И. Кипрушкина // Материалы V Международной конференции «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке». – СПб.: СПбГУНиПТ, 2011. – С. 350–353.

#### Список литературы на английском языке / References in English

1. Pishchevaya khimiya [Food Chemistry] / Nechaev A. P., Traubenberg S. E., Kochetkova A. A. et al. Ed. by A.P. Nechaev. – St. Petersburg: GIORD, 2001. – 592 p. [in Russian]
2. Khangildin V.V. Gomeostaticnost' i adaptivnost' sortov ozimoy pshenitsy [Homeostatic and adaptability of winter wheat varieties] / V.V. Khangildin, N. A. Litvinenko // Nauch.-tekhn. byul [Scientific-technical bull.]. – 1981. – No. 1. – P. 8-14. [in Russian]
3. Medvedev, P.V. Kompleksnaya otsenka potrebitel'skikh svoystv zerna i produktov yego pererabotki [Comprehensive assessment of consumer properties of grain and products of its processing] / P.V. Medvedev, V. A. Fedotov, I. A. Bochkareva // Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal [International Scientific Journal]. – 2015. – No. 7-1 (38). – P. 77-80. [in Russian]
4. Fedotov, V. A. Faktory formirovaniya potrebitel'skikh svoystv zernomuchnykh tovarov [Factors of consumer properties formation of grain products] / V. A. Fedotov // Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of the Orenburg State University]. – 2011. – No. 4. – P. 186-190. [in Russian]
5. Berkutova, N. S. Mikrostruktura pshenitsy [Microstructure of wheat] / N. S. Berkutova, I. A. Shvetsova. – М.: Kolos, 1977. – 122 p. [in Russian]
6. Fedotov V. A., Medvedev P. V. Informatsionno-izmeritel'naya sistema opredeleniya potrebitel'skikh svoystv pshenitsy [Information-measuring system for determining the consumer properties of wheat] / Fedotov V. A., Medvedev P. V. // Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of the Orenburg State University]. – 2013. – No. 3. – P. 140-145. [in Russian]
7. Tarasenko F. P. Prikladnoy sistemnyy analiz (nauka i iskusstvo resheniya problem): Uchebnik [Applied system analysis (science and the art of problem solving): Textbook] / F. P. Tarasenko. – Tomsk; Tomsk University Press, 2004. – 128 p. [in Russian]
8. Regiony Rossii: sotsial'no-ekonomicheskiye pokazateli [Regions of Russia: socio-economic indicators]. 2016: stat. collection / Rosstat. – М., 2016. – 995 p. [in Russian]
9. Medvedev P. V. Informatsionno-izmeritel'nyye sistemy upravleniya potrebitel'skimi svoystvami zernomuchnykh tovarov [Information-measuring systems for managing consumer properties of grain products] / P. V. Medvedev, V. A. Fedotov // Sovremennyye tendentsii v ekonomike i upravlenii: novyy vzglyad : monografiya [Modern trends in economics and management: a new look: monograph]. – Orenburg: LLC Press Agency, 2013. – P. 35-51. [in Russian]
10. Shepelev A. F. Tovarovedeniye i ekspertiza elektrotovarov: uchebnoye posobiye dlya vuzov [Commodity research and examination of electrical products: a textbook for universities] / A. F. Shepelev, I. A. Pechenizh. – Rostov-on-Don: Phoenix, 2002. – 192 p. [in Russian]
11. Medvedev P.V. Upravleniye kachestvom produktov pererabotki zerna i zernomuchnykh tovarov [Quality management of grain processing products and grain products] / P.V. Medvedev, V.A. Fedotov, I.A. Bochkareva // Nauchnyy zhurnal NIU ITMO. Seriya: Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv [Scientific journal NRU ITMO. Series: Processes and Food Production Equipment]. – 2016. – No. 1. – P. 61 - 69. [in Russian]
12. Potoroko I.Yu. Sovremennoye sostoyaniye i tendentsii razvitiya khlebopekarnoy otrasli [Current state and development trends of baking industry] / I.Yu. Potoroko, N.V. Androsova // Sbornik materialov XII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Torgovo-ekonomicheskiye problemy regional'nogo biznes-prostranstva» [Proceedings of the XII International Scientific and Practical Conference "Trade and Economic Problems of the Regional Business Space"] – Chelyabinsk: SUSU Publishing House, 2014. – P. 168–170. [in Russian]
13. Kiprushkina E.I. Innovatsionnyye tekhnologii proizvodstva i khraneniya rastitel'noy produktsii [Innovative technologies for production and storage of plant products] / E.I. Kiprushkina // Materialy V Mezhdunarodnoy konferentsii «Nizkotemperaturnyye i pishchevyye tekhnologii v XXI veke» [Materials of the V International Conference "Low-temperature and food technologies in the XXI century"]. – SPb.: SPbGUNIPT, 2011. – P. 350–353. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.90.12.022>

## ПРОБЛЕМАТИКА ОБЕСПЕЧЕНИЯ АВИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ТЕРРОРИСТИЧЕСКИХ УГРОЗАХ

Научная статья

**Хачикян П.П. \***

МГТУ ГА, Москва, Россия

\* Корреспондирующий автор (pavel[at]gosmail.su)

### Аннотация

В научной статье рассматривается проблематика обеспечения авиационной безопасности при террористических угрозах. Терракты, совершаемые на воздушном транспорте, оказывают значительный устрашающий эффект на мировое сообщество, показывают недостаточную эффективность предпринимаемых мер безопасности в борьбе с терроризмом, что и определяет важнейшую цель как снижение риска совершения терактов на воздушном транспорте. В рамках статьи проводится обоснование актуальности проблемы, приводятся существующие методы достижения заданной цели и предложение автора.

**Ключевые слова:** террористические угрозы, опасность терроризма, обеспечение авиационной безопасности, терроризм в авиации, террористы-смертники, авиационные происшествия, антитеррористическая безопасность.

## PROBLEM OF ENSURING AVIATION SECURITY IN TERRORIST THREATS

Research article

**Khachikyan P.P. \***

Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia

\* Corresponding author (pavel[at]gosmail.su)

### Abstract

This paper considers the issue of ensuring aviation security in case of terrorist threats. Terroristic acts carried out on air transport have a significant frightening effect on the world community, show the insufficient effectiveness of the security measures taken in the fight against terrorism, which defines the most important goal as reducing the risk of terrorist attacks on air transport. In the framework of the article, the relevance of the problem is substantiated, the existing methods for achieving the given goal and the author's proposal are presented.

**Keywords:** terrorist threats, the danger of terrorism, ensuring aviation security, terrorism in aviation, suicide bombers, aircraft accidents, anti-terrorism security.

### Введение

Трагические события последних десятилетий доказали значимость необходимости обеспечения должных мер антитеррористической безопасности на воздушном транспорте. Терракт 24.01.2011 в аэропорту Домодедово [0], взрывы воздушных судов 24.08.2004 г., совершавших полеты из аэропорта Домодедово в Сочи и Волгоград [2], взрыв воздушного судна 31.10.2015 г. в небе над Египтом [3] – вот лишь неполный список трагических событий, которые унесли жизни невинных граждан нашей страны в мирное время и причинили колоссальный материальный ущерб авиакомпаниям и государству. Перечисленные события и определяют цель как необходимость снижения риска теракта на воздушном транспорте.

### Основная часть статьи

Антитеррористическая безопасность на воздушном транспорте становится все более актуальным вопросом в связи с ростом числа транспортных потребностей и увеличением пассажиропотока. Факт нахождения большого количества людей в технически сложном, двигающемся аппарате, без возможности экстренной остановки или эвакуации людей – несомненно, требует чрезвычайного внимания в области обеспечения безопасности. В классическом толковании, вопросы безопасности в авиации состоят из двух составляющих – это требования в области авиационной безопасности и безопасности полетов. Пункт 1 статьи 83 Воздушного кодекса РФ от 19.03.1997 № 60-ФЗ определяет понятие авиационная безопасность, как состояние защищенности от незаконного вмешательства в деятельность в области авиации [4]. Авиационная безопасность обеспечивается комплексом мер по противодействию незаконному вмешательству в деятельность авиации с помощью служб безопасности с целью предотвращения возможных угроз. Понятие безопасности полетов является более узким и характеризует непосредственную способность воздушного транспорта выполнять полеты без угрозы для жизни и здоровья людей. Основные понятия о безопасности полетов были заложены НПП ГА-85 (Наставление по производству полетов) от 1985 г. [5], а позже значительно усовершенствованы и дополнены в Федеральных авиационных правилах [6]. Рассматривая вопросы террористических угроз в рамках конкретной статьи, следует отметить, что проблематика терроризма относится одновременно как к безопасности полетов, так и к авиационной безопасности. При этом важным является, что антитеррористическая безопасность авиапредприятия является узкоспециализированным понятием и входит в общее определение авиационной безопасности.

Субъектами террористических актов в вышеуказанных случаях являлись террористические сообщества и террористы-смертники, а избранные ими объекты терроризма – воздушные суда и наземная инфраструктура авиапредприятий, были отобраны исключительно по критерию наличия открытых критических уязвимостей в системе обеспечения безопасности, что и позволило реализовать противоправные планы террористов без значительных затрат

и усилий. Соответственно, возникает промежуточный вывод - риск теракта находится в линейной зависимости от уязвимостью объекта.

Проведем краткий анализ причин вышеперечисленных терактов:

1) в случае с терактом в аэропорту Домодедово 24.01.2011 г., объект теракта был избран по критерию наименьшего контроля со стороны служб, обеспечивающих безопасность, показал недоработки систем досмотр и контроля;

2) при трагических событиях 24.08.2004 г., связанных со взрывом в воздухе двух российских авиалайнеров, террористы воспользовались недостатками проведения досмотровых процедур и халатностью отдельных должностных лиц, которые и позволили пронести на борта воздушных судов взрывные устройства;

3) воздушное судно в небе над Египтом 31.10.2015 г. было уничтожено в воздухе с помощью взрывного устройства, установленного в грузовом отсеке представителем одной из подрядных организаций или попавшего на борт с багажом, что также свидетельствует о недоработках организации и проведения досмотровых процедур.

Таким образом, факты возникновения и совершения вышеперечисленных терактов позволяют сделать вывод о наличии недостатков в существующем механизме оценки уязвимостей объектов авиационной инфраструктуры, проводимой в соответствии с приказом Минтранса России от 12.04.2010 N 87 (ред. от 26.02.2019) "О порядке проведения оценки уязвимости объектов транспортной инфраструктуры и транспортных средств"[7], которые и привели к возможности совершения терактов и выбору конкретных целей террористами – указанных аэропортов, воздушных судов. Несмотря на государственное регулирование и оценку уязвимости авиапредприятия, проводимую аттестованными организациями, авиапредприятия имеют некоторую свободу, в рамках которой и возможно снижение уровня обеспечения безопасности, которое и приводит к трагическим событиям в виде совершенных терактов. По мнению автора, проводимая в настоящее время оценка уязвимости объектов транспорта носит формальный характер и не позволяет в полной мере решить задачи обеспечения безопасности по следующим причинам:

1) оценка объектов транспорта проводится аккредитованными организациями, а не самим государственным надзорным или контролирующим органом, что увеличивает шансы на возникновение коррупционных отношений и завышение показателей в отчетах по требованию авиапредприятий;

2) невысокие требования к предприятиям для прохождения аккредитации по оценке уязвимости, что влияет на невысокую квалификацию экспертов, специалистов, проводящих соответствующую оценку.

Указанные доводы подтверждаются самими событиями – терактами, при которых, в качестве причин теракта были выявлены именно недостатки в обеспечения антитеррористической безопасности, которые и подлежат шкалированию в рамках проведения оценки уязвимости.

Таким образом, у авиапредприятия возникает необходимость в проведении дополнительных действий и мероприятий, связанных с необходимостью снижения риска теракта, что и рассмотрено далее.

Как и в любой финансово затратной отрасли, вопросы обеспечения безопасности (надежности функционирования) являются дорогостоящими, что дает возможность сделать тривиальный вывод об излишней экономии авиапредприятий на статью расходов, связанную с обеспечением антитеррористической безопасности.

Для снижения риска теракта, необходимо выделить составляющие элементы, на которых и должна быть построена система безопасности при террористических угрозах каждого авиапредприятия (схема 1):

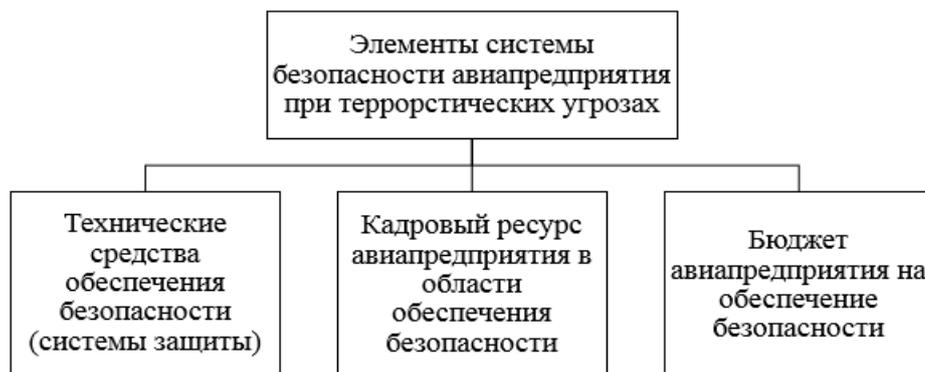


Рис. 1 – Элементы системы безопасности авиапредприятия при террористических угрозах

Приведенное наглядно показывает необходимость выполнения следующих действий (прим. – как пути решения задачи) для достижения поставленной цели в максимальном значении вероятности снижения риска возникновения и совершения теракта:

- а) повысить техническую оснащенность авиапредприятия в области систем безопасности и защиты
- б) повысить уровень подготовки кадров, задействованных в области обеспечения безопасности;
- в) увеличить бюджет настолько или располагать таким бюджетом, при котором авиапредприятие сможет покрыть расходы, связанные с выполнением пунктов в максимальных значениях а) и б).

Изложенное позволяет воспользоваться математическим аппаратом для решения задач подобного типа. Следует отметить что математическое моделирование успешно применяется учеными в области авиации при решении практических задач, например, в научных трудах профессоров Б.В. Зубкова и Шарова В.Д. приводятся математические модели определения рисков в авиапредприятиях при разработке системы управления безопасностью полетов [8].

Необходимо полагать, при ведении хозяйственной деятельности любого предприятия, финансовый ресурс всегда ограничен, что и предопределяет необходимость решения подзадачи по разработке соответствующей математической модели обеспечения определенной (заданной) надежности с помощью распределения ограниченного финансового ресурса (бюджета авиапредприятия) по критерию использования минимального заданного бюджета, для чего обозначим:

$Q$  – вероятность надежности системы антитеррористической безопасности авиапредприятия;

$P_j$  – вероятность бесбойного функционирования элемента системы обеспечения антитеррористической безопасности, где  $j = \overline{1, N}$ ;

$D$  – финансовый ресурс (бюджет) авиапредприятия;

$N$  – системы элементов обеспечения антитеррористической безопасности авиапредприятия, где каждый  $p_j$  независим друг от друга.

Сформулируем вышеизложенную задачу в следующем виде: «Как при заданной вероятности надежности системы  $Q = \prod_{j=1}^N P_j$  обеспечить достижение ее при минимальном финансовом ресурсе  $D$ ?».

При этом необходимо предусматривать, что  $\frac{\partial D}{\partial P_j} = 0$ , где  $j = \overline{1, N-1}$ , что выводит на следующую систему уравнений:

$$\frac{B_j}{1 - P_j} = \frac{Q}{P_j} \cdot \frac{B_N}{\prod_{i=1}^{N-1} P_i - Q} \quad (1)$$

Далее проведем простейшие преобразования и получим:

$$\frac{B_j P_j}{1 - P_j} = \frac{Q B_N}{\prod_{i=1}^{N-1} P_i - Q} \quad (2)$$

Учитывая, что  $Q = \prod_{j=1}^N P_j$ , полученное соотношение можно представить и в симметричной форме:

$$\frac{B_j P_j}{1 - P_j} = \frac{B_N P_N}{1 - P_N}; \quad j = \overline{1, N-1} \quad (3)$$

Преобразуем полученное уравнение и получим следующее:

$$P_j = \frac{B_N P_N}{B_N P_N + B_j (1 - P_N)}; \quad j = \overline{1, N-1} \quad (4)$$

Перемножив между собой все  $(N-1)$  уравнения и умножив их на  $P_N$  получим;

$$P_N \cdot \prod_{j=1}^{N-1} P_j = \frac{B_N P_N}{B_N P_N + B_j (1 - P_N)}; \quad j = \overline{1, N-1} \quad (5)$$

Поскольку  $P_N$  близко к 1, то равенство (5) допустимо представить в виде:

$$Q = P_N \prod_{j=1}^{N-1} \left( 1 - \frac{B_j (1 - P_N)}{B_N P_N} \right) = P_N \left( 1 - \frac{1 - P_N}{B_N P_N} \sum_{j=1}^{N-1} B_j \right) \quad (6)$$

Таким образом, выражение для искомой вероятности будет иметь вид:

$$P_N = 1 - \frac{B_N(1-Q)}{\sum_{j=1}^N B_j} \quad (7)$$

Выражения для  $P_j$ , где  $j = \overline{1, N-1}$ , может быть получено из формулы (4).

Далее выполним преобразования формулы аналогично, как это было для  $P_N$ . Прямое сравнение получающихся формул показывает их совпадение с той же точностью, с какой выполняется соотношение (6). Это позволяет использовать симметричную форму записи:

$$P_j = 1 - \frac{B_j(1-Q)}{\sum_{j=1}^N B_j}, \quad j = \overline{1, N} \quad (8)$$

Полный ресурс, который обеспечивает заданную надежность системы можно изобразить в виде следующего соотношения, при этом можно сказать о том, что формула представляет собой логарифмическую модель распределения надежности при заданном финансовом ресурсе:

$$D = \sum_{j=1}^N B_j \lg(1 - P_j) \quad (9)$$

Далее, чтобы найти минимальное значение финансового ресурса, необходимо выполнить следующее: в соотношение (8) подставить в равенство (9), в результате чего получаем:

$$D_{\min} = \sum_{j=1}^N B_j \lg \left[ \frac{B_j(1-Q)}{\sum_{i=1}^N B_i} \right] \quad (10)$$

Эффективность предлагаемого распределения ресурса по вышеуказанной формуле целесообразно оценить путем сравнения его со случаем равномерного распределения между каждым из  $N$  элементов.

В последнем случае  $P_j = \sqrt[N]{Q}$ , а поэтому в соответствии с формулой (9) ресурс будет равным:

$$D_0 = \sum_{j=1}^N P_j \cdot \lg(1 - \sqrt[N]{Q}) \quad (11)$$

Таким образом, эффективность распределения финансового ресурса можно оценить следующим отношением:

$$\eta = \frac{D_0}{D_{\min}} = \frac{\sum_{j=1}^N P_j \cdot \lg(1 - \sqrt[N]{Q})}{\sum_{j=1}^N \left\{ P_j \lg \left[ \frac{(1-Q)P_j}{\sum_{i=1}^N B_i} \right] \right\}} \quad (12)$$

### Заключение

Снижение риска террористического акта является важнейшей целью обеспечения безопасности в авиационной отрасли. В качестве одного из способов достижения поставленной цели рассматривается решение задачи по обеспечению заданной надежности функционирования системы безопасности авиапредприятия при минимальном, ограниченном финансовом ресурсе. Ограниченность финансового ресурса рассматривается как типовая ситуация для любого авиапредприятия, которое старается минимизировать свои расходы. В научной статье показан один из авторских вариантов решения задачи обеспечения заданной надежности системы антитеррористической безопасности авиапредприятия по критерию минимизации финансового ресурса с помощью классического математической моделирования, приводится также оценка эффективности использования ресурса в виде соответствующей формулы.

Вышеизложенное позволяет сделать вывод о возможности применения математического аппарата для решения актуальных прикладных задач, в том числе в сфере обеспечения антитеррористической безопасности в авиации.

**Конфликт интересов**

Не указан.

**Conflict of Interest**

None declared.

**Список литературы / References**

1. ria.ru [Электронный ресурс]: Теракт в аэропорту "Домодедово" 24 января 2011 года. URL: <https://ria.ru/20160124/1363238677.html> (дата обращения: 10.09.2019)
2. ria.ru [Электронный ресурс]: Теракты 24 августа 2004 года в самолетах Ту-154 и Ту-134. Справка. URL: <https://ria.ru/20090824/182146689.html> (дата обращения: 11.09.2019)
3. fb.ru [Электронный ресурс]: Авиакатастрофа в Египте 31 октября 2015 года: причины. Рейс 9268. URL: <https://fb.ru/article/261934/aviakatastrofa-v-egipte-oktyabrya-goda-prichinyi-reys> (дата обращения: 11.09.2019)
4. "Воздушный кодекс Российской Федерации" от 19.03.1997 N 60-ФЗ (ред. от 03.08.2018) // СПС КонсультантПлюс
5. Приказ МГА СССР от 08.04.1985 N 77 "Об утверждении введении в действие Наставления по производству полетов в гражданской авиации СССР (НПП ГА-85)" // СПС КонсультантПлюс
6. Приказ Минтранса России от 28.06.2007 N 82 (ред. от 14.01.2019) "Об утверждении Федеральных авиационных правил "Общие правила воздушных перевозок пассажиров, багажа, грузов и требования к обслуживанию пассажиров, грузоотправителей, грузополучателей" (Зарегистрировано в Минюсте России 27.09.2007 N 10186) // СПС КонсультантПлюс
7. Приказ Минтранса России от 12.04.2010 N 87 "О порядке проведения оценки уязвимости объектов транспортной инфраструктуры и транспортных средств" (Зарегистрировано в Минюсте России 21.05.2010 N 17321) // СПС КонсультантПлюс
8. Зубков Б.В. Теория и практика определения рисков в авиапредприятиях при разработке системы управления безопасностью полетов / Зубков Б.В., Шаров В.Д. - М.: МГТУ ГА, 2010.

**Список литературы на английском языке / References in English**

1. ria.ru [Electronic resource]: Terakt v aeroportu "Domodedovo" 24 yanvarya 2011 goda [terrorist Attack at Domodedovo airport on January 24, 2011]. URL: <https://ria.ru/20160124/1363238677.html> (accessed: 10.09.2019) [in Russian]
2. ria.ru [Electronic resource]: Terakty 24 avgusta 2004 goda v samoletah Tu-154 i Tu-134. Spravka [terrorist Attacks on August 24, 2004 in the Tu-154 and Tu-134. Reference] URL: <https://ria.ru/20090824/182146689.html> (accessed: 11.09.2019) [in Russian]
3. fb.ru [Electronic resource]: Aviakatastrofa v Egipte 31 oktyabrya 2015 goda: prichiny. Rejs [plane Crash in Egypt on October 31, 2015: causes. Flight 9268]. URL: <https://fb.ru/article/261934/aviakatastrofa-v-egipte-oktyabrya-goda-prichinyi-reys> (date accessed: 11.09.2019) [in Russian]
4. "Vozdushnyj kodeks Rossijskoj Federacii" ot 19.03.1997 N 60-FZ (red. ot 03.08.2018) ["Air code of the Russian Federation" of 19.03.1997 N 60-FZ (ed. of 03.08.2018)] // ATP ConsultantPlus [in Russian]
5. Prikaz MGA SSSR ot 08.04.1985 N 77 "Ob utverzhdanii vvedenii v dejstvie Nastavleniya po proizvodstvu poletov v grazhdanskoj aviacii SSSR (NPP GA-85)" [The order of MGA of the USSR of 08.04.1985 N 77 "about the approval of introduction of the instruction On production of flights in civil aviation of the USSR (NPP GA-85)"] // SPS ConsultantPlus [in Russian]
6. Prikaz Mintransa Rossii ot 28.06.2007 N 82 (red. ot 14.01.2019) "Ob utverzhdanii Federal'nyh aviacionnyh pravil "Obshchie pravila vozdushnyh perevozk passazhirov, bagazha, gruzov i trebovaniya k obsluzhivaniyu passazhirov, gruzootpravitelej, gruzopoluchatelej" (Zaregistrovano v Minyuste Rossii 27.09.2007 N 10186) [Order of the Ministry of transport of Russia of 28.06.2007 N 82 (ed. of 14.01.2019) "on approval of Federal aviation rules" General rules of air transportation of passengers, baggage, cargo and requirements for service of passengers, shippers, consignees" (Registered in the Ministry of justice of Russia 27.09.2007 N 10186)] // SPS ConsultantPlus [in Russian]
7. Prikaz Mintransa Rossii ot 12.04.2010 N 87 "O poryadke provedeniya ocenki uyazvimosti ob"ektov transportnoj infrastruktury i transportnyh sredstv" (Zaregistrovano v Minyuste Rossii 21.05.2010 N 17321) [Order of Ministry of transport of Russia dated 12.04.2010 № 87 "On the procedure for assessing the vulnerability of transport infrastructure objects and vehicles" (Registered in Ministry of justice of Russia 21.05.2010 N 17321)] // ATP ConsultantPlus [in Russian]
8. Zubkov B. V. Teoriya i praktika opredeleniya riskov v aviapredpriyatiyah pri razrabotke sistemy upravleniya bezopasnost'yu poletov [Theory and practice of determining risks in airlines in the development of safety management system] / Zubkov B. V., Sharov V. D. - Moscow: MGTU GA, 2010. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.90.12.023>

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ КОГНИТИВНЫХ СТРУКТУР

Научная статья

Черный С.А.<sup>1</sup>, Шестаков А.В.<sup>2</sup> \*

<sup>1,2</sup> Институт компьютерных технологий и информационной безопасности Южного федерального университета, Таганрог, Россия

\* Корреспондирующий автор (trtualval[at]rambler.ru)

### Аннотация

В статье рассматриваются вопросы, связанные с решением задачи построения и обработки когнитивных структур на основе использования нейронных сетей. Рассмотрена организация специализированной модели, настроенной на решения поставленной задачи и обозначаемой, как «нейросетевая когнитивная модель (НКМ)». Приводится описание основного элемента указанной модели, обозначенного, как «нейрокогнитивный элемент (НКЭ)» и правил его формирования. Рассматриваются правила отображения когнитивных структур на нейрокогнитивные модели. Представлены как структурные описания данных моделей, так и процедурные модели их формирования.

**Ключевые слова:** когнитивная модель, концепт, причинно – следственная связь, нейроэлемент, синаптическая связь.

## APPLICATION OF NEURAL NETWORKS FOR COGNITIVE STRUCTURES MODELING

Research article

Cherniy S.A.<sup>1</sup>, Shestakov A.V.<sup>2</sup> \*

<sup>1,2</sup> Institute of Computer Technology and Information Security of the Southern Federal University, Taganrog, Russia

\* Corresponding author (trtualval[at]rambler.ru)

### Abstract

The article discusses issues related to solving the problem of constructing and processing cognitive structures based on the use of neural networks. The authors consider the organization of a specialized model that is configured to solve the problem and denoted as a "neural network cognitive model (NNCM)." They describe the main elements of this model, designated as a "neurocognitive element (NCE)" and the rules for its formation. The regulations of cognitive mapping structures to neurocognitive models are considered as well. Both structural descriptions of these models and procedural models of their formation are presented in the paper.

**Keywords:** cognitive model, concept, causal relationship, neuroelement, synaptic connection.

### Введение

Применение аппарата когнитивного моделирования для анализа и исследования различных, особенно слабоформализуемых объектов получает все большее распространение [1], [2], что обуславливает целесообразность его развития для повышения эффективности и расширения областей применения. Это в свою очередь связано с подготовкой соответствующего инструментария. Общность топологических когнитивных и нейросетевых представлений, базирующихся на основе графовых структур [3], создает предпосылки для нейросетевого формирования и моделирования когнитивных систем. Указанные предпосылки базируются на ряде очевидных соответствий обсуждаемых моделей – графовой, когнитивной, нейросетевой. Первое соответствие: концепт когнитивной структуры отображается как нейроэлемент (нейрон) нейросетевой структуры. Причем, оба этих элемента соответствуют вершине графа в графовой модели. Второе соответствие: причинно-следственные связи из когнитивных моделей отображаются в нейросетевых моделях синаптическими связями между нейроэлементами. Соответственно, как причинно-следственные связи, так и синаптические связи соответствуют дугам в графовых моделях.

На основании вышеизложенного, в настоящей статье рассматривается вопрос об организации использования нейросетевых моделей в качестве инструментария для формирования и решения задач на когнитивных структурах.

Применение нейросетей в качестве платформы для моделирования когнитивных процессов позволит использовать широкие возможности аппарата нейросетевого моделирования [4], включая методы обучения нейросетей [5] для формирования значений причинно-следственных связей как отображения синаптических связей.

### Формирование и представление нейрокогнитивных моделей

Описание предлагаемой модели, которая определяется как нейрокогнитивная модель (НКМ), приводится на основе графовых представлений:

$$мНКМ = (мНКЭ, мСС), \quad (1)$$

$$мНКЭ = \{мнкЭ_{ii}\}_{ii=1...II} \quad (2)$$

Здесь: мНКЭ – множество нейроконцептов (нейрокогнитивных элементов - НКЭ), соответствующих концептам моделируемой когнитивной структуры (II- общее число НКЭ в НКМ и, соответственно, число концептов в отображаемой когнитивной модели). Структурное описание нейрокогнитивного элемента (нейроконцепта) формируется в виде кортежа:

$$\text{мнк}_{i1} = \langle i1; i_{i1}; \text{вр}_{i1}; \text{пс}_{i1} \rangle \quad (3)$$

Здесь:  $i1$  – номер нейроконцета (отображающего концепт когнитивной структуры) как вершины графовой структуры;  $i_{i1}$  – имя концепта (тестовая строка);

$\text{вр}_{i1}$  – значение выходной реакции нейроконцета, т.е. воздействия, оказываемого на смежные нейроконцепты через синаптические связи;

$\text{пс}_{i1}$  – значение состояния нейроконцета, с одной стороны, отражающее «активность» элемента в ходе процесса всего процесса (сеанса моделирования), с другой стороны, и представляющее значение результата моделирования для данного нейроконцета.

мСС – множество синаптических связей определяется следующим образом:

$$\text{мСС} = \{ \text{мсс}_j \}_{j=1 \dots J}, \quad (4)$$

где каждая связь также структурно описывается кортежем:

$$\text{мсс}_j = \langle j, ij_{ист}, ij_{пр}, \text{вс}_j \rangle \quad (5)$$

Здесь:  $J$  – общее число синаптических связей,

$j$  – номер связи;

$ij_{ист}$  – номер нейроконцета, являющегося для данной связи источником;

$ij_{пр}$  – номер нейроконцета – приемника для связи;

$\text{вс}_j$  – вес синаптической связи, соответствующий весу отображаемой причинно-следственной связи отображаемой когнитивной структуры.

#### Описание нейрокогнитивного элемента

Формальная модель функционирования НКЭ описывается в виде нижеприводимой алгоритмической последовательности соотношений. В указанном описании принимаются следующие правила индексации. Индекс текущего рассматриваемого нейрона обозначается через  $i1$ . Индексы смежных нейронов, воздействующих на входы текущего – через  $i2$ . Определение значения элементарного входного воздействия:

$$\text{эвв}(t)_{i1,i2} = \text{вр}(t)_{i1,i2} * \text{вс}_{i1,i2} \quad (6)$$

Здесь  $\text{вр}(t)_{i1,i2}$  – значение реакции нейроконцета  $i2$ , являющегося входным по отношению к нейроконцепту  $i1$ .

Данное соотношение определяет значение воздействия от одного из смежных нейронов, являющихся входным (оказывающим влияние на текущий).

Определение значения входного потенциала, как суммарного воздействия элементарных:

$$\text{вп}(t)_{i1} = \sum_{i2=1 \dots I2} (\text{эвв}(t)_{i1,i2}) \quad (7)$$

Здесь  $I2$  – общее число смежных вершин, являющихся входными по отношению к вершине  $i1$  и, соответственно, число входных в  $i1$  синаптических связей.

Определение мгновенного потенциала нейроконцета:

$$\text{пм}(t)_{i1} = f_m(\text{вп}(t)_{i1}, \text{пм}(t-1)_{i1}, \text{пс}(t-1)_{i1}, Q_{i1}) \quad (8)$$

Здесь  $\text{пм}(t)_{i1}$  – значение потенциала на текущем шаге;

$f_m$  – функция вычисления мгновенного потенциала;

$\text{пм}(t-1)_{i1}$  – значение мгновенного потенциала на предыдущем шаге;

$\text{пс}(t-1)_{i1}$  – значение потенциала сеансовой активности концепта, определенного на предыдущем шаге;

$Q_{i1}$  – порог срабатывания нейроконцета.

Определение значения состояния нейроконцета:

$$\text{пс}(t)_{i1} = f_c(\text{пм}(t)_{i1}, \text{пс}(t-1)_{i1}) \quad (9)$$

Здесь:  $f_c$  – функция вычисления значения состояния нейроконцета.

Вид функции подбирается эмпирическим образом в процессе моделирования, тем не менее, для большинства случаев может быть использована простая полиномиальная форма:

$$\text{пм}(t)_{i1} = k_{m1} * \text{вп}(t)_{i1} + k_{m2} * \text{пм}(t-1)_{i1} - k_{m2} * \text{пс}(t-1)_{i1} \quad (10)$$

Здесь  $k_{m1}, k_{m2}, k_{m3}$  – эмпирические подбираемые масштабные коэффициенты.

Определение значения выходной реакции концепта:

$$\text{вр}_{i1} = f_b(\text{пм}(t)_{i1}) \quad (11)$$

Здесь  $f_v$  – функция преобразования  $pm(t)_{i1}$ , вводимая с целью внесения нелинейности в формируемые модели. В качестве функции может быть использована наиболее распространенная в теории нейронных сетей функция сигмоид [6]. Однако допускается использование простого соотношения:

$$vr_{i1} = pm(t)_{i1} \quad (12)$$

Как следует из рассмотренных соотношений, в приводимом описании мНКЭ осуществлена попытка совмещения параметров, присущих когнитивным структурам с параметрами, присущими нейросетям. Мгновенный потенциал из мНКЭ по смыслу соответствует мембранному потенциалу из нейросетевых моделей [6], [7]. Период его воздействия заключен в рамки между двумя переходами через пороговое значение. В отличие от мгновенного потенциала, который не отражает общей степени активности на всем периоде моделирования (а только на интервале между пороговыми переходами), параметр сеансовой активности связан с общей активностью нейрокогнитивного элемента на всем периоде моделирования.

Необходимо также пояснить различные функциональные роли в мНКЭ мгновенного потенциала и значения состояния. В традиционных когнитивных моделях параметр «значение концепта» определяет как его текущее состояние (уровень активности концепта), так и величину его воздействия на смежные концепты. В предлагаемой нейрокогнитивной модели эти две функции разнесены по двум отдельным параметрам. Параметр выхода связан с «мгновенной» реакцией НКЭ, учитывающей мгновенные возмущения. Значение состояния элемента аккумулирует историю его поведения в течение всего процесса моделирования, сглаживая отдельные «всплески».

Предполагаемая схема жизненного цикла НКМ включает несколько этапов в соответствии с нижеследующим:

#### 1. Формирование модели

Включает получение и обработку информации от экспертов [8], [9]. На основании полученной информации формируется: а) топология сети; б) начальные значения потенциалов когнитивных нейроэлементов; в) значения синаптических связей.

#### 2. Реализация процесса моделирования

Общий процесс моделирования организуется в виде набора сеансов. Каждый сеанс включает в себя последовательность подэтапов:

2а. Формирование начального состояния моделей. Заключается в присваивании начальных значений концептов, которое может осуществляться несколькими способами:

- а) принимаются значения, полученные на этапе формирования модели;
- б) принимаются значения, полученные по окончании одного из предыдущих сеансов;
- в) эвристически назначаемые пользователем.

2б. Инициализация воздействий. Заключается в указании начальных воздействий НКЭ, т.е. с которых начинается вычисления концептов по сети. При этом в индивидуальном порядке для данных НКЭ могут назначаться собственные для данного сеанса значения, которые являются начальными параметрами сеанса. Как правило, входные значения формируются в виде функций во времени или дискретной последовательности [10], задающей определенный процесс внешнего воздействия на моделируемую систему. Данные воздействия могут соотноситься как с управляющими/планируемыми воздействиями, так и возмущениями внешней среды. Результатами моделирования на определенном шаге являются значения состояний нейроконцептов на этом шаге

#### Заключение

Использование нейросетевого аппарата для описания и реализации когнитивных процессов позволяет не только использовать сформированных к настоящему времени комплексов нейросетевого моделирования, но и обеспечить вычислительную поддержку функций формирования, обучения и корректировки когнитивных сетей, отображающих на нейросетевые модели.

#### Финансирование

Исследование было выполнено при финансовой поддержке в рамках гранта РФФИ №19-01-00412 «Разработка моделей и алгоритмов когнитивного и нейроэволюционного моделирования для поддержки принятия решения в интеллектуальных информационно – управляющих системах».

#### Конфликт интересов

Не указан.

#### Funding

The research was carried out with financial support under RFBR grant No. 19-01-00412 "development of models and algorithms of cognitive and neuroevolutionary modeling to support decision-making in intelligent information and management systems".

#### Conflict of Interest

None declared.

#### Список литературы / References

1. Кудж С.А. Когнитивные модели и методы Краткий словарь-справочник/ С.А. Кудж, И.В. Соловьёв, Цветков В.Я. - М: МГТУ МИРЭА, 2014. –С. 95с.
2. Колоденкова А.Е. Построение системы когнитивных моделей и методов анализа реализуемости проекта по созданию информационно – управляющих систем для атомных станций / А.Е. Колоденкова // Глобальная ядерная безопасность – 2016. - №3(20), С. 43 – 50.
3. Кулинич А.А. Когнитивная система поддержки принятия решений “Канва” / А.А Кулинич // Программные продукты и системы. –2002. – №3. – С. 23 - 27
4. Гинис Л.А. Нечеткое когнитивное моделирование для предупреждения рискованных ситуаций на объектах критической инфраструктуры. / Л.А. Гинис, А.Е. Колоденкова // Вестник УТАТУ. - 2017, т. 21, № 4(78), С. 113–120

5. Николенко С.И. Глубокое обучение / С.И. Николенко, А.А.Кадури, Е.В. Архангельская — СПб.: Питер, 2018. — 480 с.
6. Гузик В.Ф. Модели нейронов с памятью состояния для организации нейроэволюционных вычислений / В.Ф. Гузик, Б.В. Катаев, С.А. Черный, А.В. Шестаков // Научный журнал КубГАУ, 2017, № 133(09) С. 467-474, URL:ej.kubagro.ru/2017/09/pdf/36.pdf.
7. Чернухин Ю.В. Искусственный интеллект и нейрокompьютеры./ Ю.В. Чернухин – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1997, С. 273
8. Барский А.Б. Нейронные сети: распознавание, управление, принятие решений / А.Б. Барский — М.: Финансы и статистика, 2004. — С. 176
9. Исмиханов З.Н. Вопросы структуризации знаний эксперта в виде когнитивных карт / З.Н. Исмиханов, А.С. Шамхалов, К.М. Султанов // Современные наукоемкие технологии, 2016, №4 (часть 2), С. 247 - 250
10. Кулинич А.А. Методология когнитивного моделирования сложных плохо определенных ситуаций / А.А. Кулинич // Вторая Междунар. конф. по проблемам управления: тр. конф, М.: Изд-во ИПУ РАН, 2003, С. 114 – 118.

#### Список литературы на английском языке / References in English

1. Kuj S.A. ognitivnye modeli i metody Kratkij slovar'-spravochnik [Cognitive models and methods Brief dictionary-reference book] / S.A. Kuj, I.V. Soloviev, Tsvetkov V.Ya. - M: MSTU MIREA, 2014. – 95p. [in Russian]
2. Kolodenkova A.E. Postroenie sistemy kognitivnyh modelej i metodov analiza realizuemosti proekta po sozdaniyu informacionno – upravlyayushchih sistem dlya atomnyh stancij [Building a system of cognitive models and methods for analyzing the feasibility of a project to create information management systems for nuclear plants] / A.E. Kolodenkova // Global Nuclear Safety - 2016. - No. 3 (20), P. 43 – 50. [in Russian]
3. Kulinich A.A. Kognitivnaya sistema podderzhki prinyatiya reshenij “Kanva” [Cognitive decision support system “Canva”] / A.A. Kulinich // Software products and systems. –2002. - Number 3. - P. 23 - 27. [in Russian]
4. Ginis L.A. Nechetkoe kognitivnoe modelirovanie dlya preduprezhdeniya riskovyh situacij na ob"ektah kriticheskoy infrastruktury [Fuzzy cognitive modeling to prevent risk situations at critical infrastructure facilities] / L.A. Ginis, A.E. Kolodenkova // Bulletin of UTATU. - 2017, vol. 21, No. 4 (78), pp. 113–120. [in Russian]
5. Nikolenko S.I. Glubokoe obuchenie [Deep learning] / S.I. Nikolenko, A.A. Kadurin, E.V. Arkhangelskaya - St. Petersburg: Peter, 2018. -- P. 480. [in Russian]
6. Guzik V.F. Modeli nejronov s pamyat'yu sostoyaniya dlya organizacii nejroevolyucionnyh vychislenij [Models of neurons with state memory for organizing neuroevolutionary computing] / V.F. Guzik, B.V. Kataev S.A. Cherny // Scientific journal of KubSAU, 2017, No. 133 (09) P. 467-474, URL: ej.kubagro.ru/2017/09/pdf/36.pdf. [in Russian]
7. Chernukhin Yu.V. Iskusstvennyj intellekt i nejrokomp'yutery [Artificial Intelligence and Neurocomputers] / Yu.V. Chernukhin - Taganrog: Publishing House of TRTU, 1997, P. 273. [in Russian]
8. Barsky A.B. Nejrionnye seti: raspoznavanie, upravlenie, prinyatie reshenij [Neural networks: recognition, control, decision making] / A.B. Barsky - M.: Finance and Statistics, 2004. - P. 176. [in Russian]
9. Ismikhanov Z.N. Voprosy strukturizacii znaniy eksperta v vide kognitivnyh kart [Issues of structuring expert knowledge in the form of cognitive maps] / Z.N. Ismikhanov, A.S. Shamkhalov, K.M. Sultanov // Modern high technology, 2016, No. 4 (part 2), P. 247 – 250. [in Russian]
10. Kulinich A.A. Metodologiya kognitivnogo modelirovaniya slozhnyh ploho opredelennyh situacij [The methodology of cognitive modeling of complex poorly defined situations] / A.A. Kulinich // The Second Int. conf. on management issues: tr. Conf., Moscow: Publishing House of IPU RAS, 2003, pp. 114 - 118. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.90.12.024>**ТЕХНОГЕННАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ПОТОКОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ПОЧВАХ В ЗОНЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ МЕДНО-НИКЕЛЕВОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Научная статья

Елсукова Е.Ю.<sup>1,\*</sup>, Опекунова М.Г.<sup>2</sup>, Опекунов А.Ю.<sup>3</sup><sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-7678-4719;<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-4592-0623;<sup>3</sup> ORCID: 0000-0002-8885-9068;<sup>1,2,3</sup> Санкт-Петербургский Государственный Университет, Санкт-Петербург, Россия

\* Корреспондирующий автор (elsukovaeu[at]mail.ru)

**Аннотация**

В статье представлены некоторые результаты работ по оценке техногенной трансформации потоков тяжелых металлов в почвах на Кольском полуострове в 2018 году. На большинстве исследованных площадок значения концентраций тяжелых металлов в почвах значительно превышают нормативы. Среднее валовое содержание Ni превышает норматив в 80 раз, содержание подвижных форм Ni – в 40 раз; среднее валовое содержание Cu – в 22 раза, содержание подвижных форм Cu – в 85 раз. Максимальные концентрации Ni, Cu, Co наблюдаются на расстоянии 8 км от источника загрязнения в южном направлении. Mn, Fe и V по территории исследования распределены относительно равномерно. Концентрации Ni, Cu, Co, Cd и Pb в верхнем горизонте почвы выше, чем в иллювиальном. Это говорит о том, что данные металлы поступают преимущественно из атмосферы. По показателю суммарного загрязнения (Zc) почвы верхнего горизонта всех площадок относятся к опасной категории, а на расстоянии 8 км от комбината – к чрезвычайно опасной. Согласно корреляции между содержанием химических элементов в почве выявлены две ассоциации: первая – Ni, Cu, Cd, Pb, Co, Zn и Mn; вторая – Cr, V, Fe и Sc. В целом, несмотря на снижение содержания тяжелых металлов в почве, их количество остается высоким и наблюдается нарушение естественного геохимического цикла.

**Ключевые слова:** почвы, загрязнение, тяжелые металлы, миграция, биогеохимия.

**TECHNOGENIC TRANSFORMATION OF HEAVY METAL STREAMS IN SOILS IN REGIONS UNDER INFLUENCE OF COPPER-NICKEL PRODUCTION**

Research article

Elsukova E.Yu.<sup>1,\*</sup>, Opekunova M.G.<sup>2</sup>, Opekunov A.Yu.<sup>3</sup><sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-7678-4719;<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-4592-0623;<sup>3</sup> ORCID: 0000-0002-8885-9068;<sup>1,2,3</sup> Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

\* Corresponding author (elsukovaeu[at]mail.ru)

**Abstract**

The paper presents the results of work on the assessment of the technogenic transformation of heavy metal flows in soils on the Kola Peninsula in 2018. The concentrations of heavy metals in soils are significantly higher than the standards at most sites studied. The average gross Ni content exceeds the standard by 80 times, the content of mobile forms of Ni by 40 times; the average gross Cu content – by 22 times, the content of mobile Cu forms – by 85 times. The maximum concentrations of Ni, Cu, Co are observed at a distance of 8 km from the pollution source in a southerly direction. Mn, Fe, and V are relatively evenly distributed throughout the study area. The concentrations of Ni, Cu, Co, Cd, and Pb in the upper soil horizon are higher than in the illuvial one. This suggests that these metals come mainly from the atmosphere. According to the total pollution index (Zc), the soils of the upper horizon of all sites are classified as dangerous, and at a distance of 8 km from the plant they are extremely dangerous. According to the correlation between the content of chemical elements in the soil, two associations are identified: the first – Ni, Cu, Cd, Pb, Co, Zn and Mn; the second one is Cr, V, Fe, and Sc. In general, despite a decrease in the content of heavy metals in the soil, their amount remains high and a disturbance in the natural geochemical cycle is observed.

**Keywords:** soil, pollution, heavy metals, migration, biogeochemistry.

**Введение**

Антропогенная нагрузка на прилегающие к комбинату Североникель, расположенному на Кольском полуострове, экосистемы сопряжена с поступлением в атмосферу выбросов, содержащих тяжелые металлы (ТМ) и соединения серы. Экологические проблемы в регионе обострились с начала 1970-х г. с переходом с местных медно-никелевых руд с низким содержанием серы на высокосернистую норильскую руду. Позже благодаря реконструкции производства выбросы были значительно сокращены. В настоящее время комбинат Североникель — промышленная площадка АО «Кольская ГМК», где перерабатывается фаянштейн, поступающий с комбината Печенганикель и завершается технологический цикл производства товарной продукции компании.

Общий вклад стационарных источников в суммарные выбросы основных загрязняющих веществ в атмосферный воздух Мурманской области в 2017 г. составил 80,5 %, в том числе твердых веществ – 99,6 %, диоксида серы – 99,8 %.

В 2017 г. выбросы основных загрязняющих веществ в атмосферный воздух от стационарных источников (242,9 тыс. т) увеличились на 11,1 тыс. т по сравнению с 2016, но сократились по сравнению с 2013, 2014 и 2015 годами. В 2017 г. по сравнению с 2016 годом объем выбросов твердых веществ увеличился на 1,182 тыс. т [1].

Наибольшее количество выбросов основных загрязняющих веществ от стационарных источников в атмосферный воздух по-прежнему отмечается на территории Печенгского района – 80,375 тыс. т (в 2016 году – 90,006 тыс. т), где расположены крупнейшие предприятия цветной металлургии. Валовые выбросы от предприятия АО «Кольская ГМК» площадки Мончегорск в 2017 году составили 44,2 тыс. тонн (42,8 тыс. тонн в 2016 г). К основным загрязняющим веществам относятся диоксид серы, оксид углерода, диоксид азота, металлы, в том числе никель, медь, ванадий, свинец, хром и другие. В целом, в 2017 г. наблюдается тенденция к снижению объемов выбросов ТМ и их соединений в атмосферный воздух в Мурманской области по сравнению с 2016 годом. Но наблюдается некоторое увеличение выбросов Ni по сравнению с 2014 годом [1].

Сотрудниками кафедры геоэкологии и природопользования СПбГУ работы по оценке экологической ситуации в регионе проводятся с 2001 года. При сравнении концентраций основных загрязняющих веществ в почвах, полученных в 2001 и 2008 гг. с концентрациями, полученными в 2014 г., выявляется явное улучшение ситуации не только на прилегающих к комбинату территориях, но и на всех участках опробования. Одной из задач работ, проведенных в 2018 году, является оценка динамики техногенной трансформации потоков ТМ в почвах.

#### Материалы и методы

Во время полевых работ в июле 2018 г. было заложено 7 геоэкологических профилей, состоящих из 21 пробной площади. Изученная территория расположена в южном направлении от основного источника загрязнения комбината Североникель в соответствии с розой ветров (таблица 1).

Таблица 1 – Расположение геоэкологических профилей по отношению к комбинату Североникель

№ профиля	Профиль	Расстояние по прямой	Расстояние от поворота на федеральную трассу	Координаты площадки, заложенной на середине профиля	Направление
1	г. Поазуайвенч	4	-	67° 54' 58.5" N 32° 58' 10.6" E	Восточное
2	6 км	3,4	6	67° 53' 41" N 32° 46' 36.8" E	Южное
3	Кировск, район ПАБСИ	45,9	-	67° 39' 34.3" N 33° 39' 10" E	Юго-восточное
4	12 км	8,1	12	67° 50' 49.2" N 32° 47' 53.7" E	Южное
5	Река Вите	14,2	17	67° 47' 32.1" N 32° 47' 1.2" E	Южное
7	Река Курка	25	32	67° 41' 33.8" N 32° 49' 13.8" E	Южное
6	Лапландский	32	41	67° 38' 9.3" N 32° 42' 14.8" E	Южное

Пробные площади заложены на разных элементах рельефа местности (вершина, склон, нижняя часть склона). На каждой пробной площади проведено описание природно-территориальных комплексов, в том числе даны характеристики мезорельефа, растительности, почв, отобраны пробы почв методом конверта из органогенного и иллювиального горизонтов.

*Профиль 1* был заложен на горе Поазуайвенч, которая находится в пределах города Мончегорск. Первая пробная площадь была расположена на вершине горы, вторая на склоне, третья – у подножья. На вершине горы растительность представлена ерниково-вороничным лишайниковым сообществом. Древесный ярус отсутствует. На склоне елово-березово-сосновый лес багульниково-водяничный. У подножья горы – сосняк багульниково-водяничный. Деревья находятся в угнетенном состоянии, наблюдаются суховершинность, флагообразные кроны. Хвоя сосны поражена хлорозом (4-5 баллов). В травяно-кустарничковом покрове присутствуют *Vaccinium myrtillus* L., *Empetrum nigrum* L., также на вершине и склоне в напочвенном покрове встречаются кустистые лишайники. На профиле имеются не только признаки эмиссионных антропогенных воздействий, но и рекреационных.

*Профиль 2* расположен на расстоянии 3 км от комбината. На этой территории в результате длительного антропогенного воздействия, а именно выпадения кислотных дождей и пожаров, травяно-кустарничковый и мохово-лишайниковый ярусы полностью уничтожены, отсутствует органогенный горизонт почв. Вместо него мы выделили антропогенно-преобразованный горизонт X. Подрост представлен *Populus tremula* L., *Betula pubescens* Ehrh.

*Профиль 3* находится в стороне от основного градиента исследования в районе Полярно-альпийского ботанического сада-института им. Н.А. Аврорина (ПАБСИ) на горе Кукисвумчорр, г. Кировск. Там заложено три пробные площади – в верхней части профиля, в средней и в нижней. На данной территории наблюдается рекреационное антропогенное воздействие в результате строительства и эксплуатации горнолыжного центра. Эмиссионное воздействие связано с деятельностью предприятия по добыче и обогащению апатит-нефелиновых руд. В верхней части склона древесная растительность отсутствует. Растительность средней и нижней частей склона представлена березово-еловым чернично-разнотравным зеленомошным сообществом. В нижней части склона в

мохово-лишайниковом ярусе преобладают сфагновые мхи. На всех площадках присутствует *Chamaenerion angustifolium* (L.) Scop. Много фауных деревьев и пней.

*Профиль 4* заложен в 8 км в южном направлении от комбината. На профиле описано четыре пробных площади. Древесный ярус, представленный березами, ивами и соснами находится, в угнетенном состоянии. Максимальная высота деревьев – 3 м. В подросте преобладает *Salix sp.*, также есть подрост *Populus tremula* L., *Betula pubescens* Ehrh., *Pinus Sylvestris* L. Травяно-кустарничковый и мохово-лишайниковый ярусы на всех пробных площадях, за исключением нижней части профиля – приручейного сообщества, практически отсутствуют. Органогенный горизонт почв частично смыт.

*Профиль 5* заложен на водосборе реки Вите в 14 км в южном направлении от комбината. На этом профиле древесный ярус более густой, чем на предыдущем. В древесном ярусе присутствуют *Pinus Sylvestris* L., *Picea sibirica* L., *Betula pubescens* высотой до 8 м, в травяно-кустарничковом – *Ledum palustre* L., *Vaccinium myrtillus* L., *Empetrum nigrum* L., также появились зеленый мох и кустистые лишайники.

*Профиль 7* заложен на территории водосбора реки Курка в 25 км в южном направлении от комбината. Растительность этого профиля отличается большим разнообразием, чем на профилях, которые располагаются ближе к комбинату. В древесном ярусе преобладает *Betula pubescens* L., на втором месте находится *Picea abies* L., присутствуют *Pinus Sylvestris* L., *Populus tremula* L., *Salix sp.* На этом расстоянии от комбината появляются *Empetrum nigrum* L., *Melampyrum pratense* L., *Solidago virgaurea* L., *Geranium pratense* L., *Trientalis europaea* L., *Lycopodium clavatum* L., *Linnaea borealis* L. В напочвенном покрове – зеленые и политриховые мхи, кустистые лишайники.

*Профиль 6* заложен на территории Лапландского заповедника. В древесном ярусе преобладает *Pinus Sylvestris* L., присутствует *Betula pubescens* L. до 12 м, в травяно-кустарничковом *Vaccinium vitis-idaea* L., *Vaccinium myrtillus* L., в мохово-лишайниковом – зеленые мхи, кустистые и бокальчатые лишайники. Почвы на исследованной территории представлены подзолами иллювиально-железистыми и иллювиально-гумусовыми на моренных отложениях.

Определение подвижных форм ТМ проведено в Ресурсном центре СПбГУ методом атомно-эмиссионной спектроскопии с применением ацетатно-аммонийного буфера (рН 4,8). Валовое содержание ТМ в почве проводилось в лаборатории Всероссийского научно-исследовательского геологического института им. А.П. Карпинского (ВСЕГЕИ) методом ICP-MS (масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой). По полученным данным о содержании ТМ в почвах были рассчитаны коэффициенты суммарного загрязнения почв (Zc) [5].

#### Степень изученности вопроса

Последствия антропогенного воздействия на экосистемы Кольского полуострова с середины двадцатого века являются предметом пристального внимания ученых. Миграцию химических элементов в почвах Кольского полуострова изучали многие исследователи.

Сухарева Т.А. [7, С. 19] на основе данных мониторинга 1997 и 2007 гг. подчеркивает, что в почве сохраняются высокие концентрации загрязняющих веществ. В работе Кашулиной Г.М. [8, С. 504] установлено, что концентрации Cu и Co в верхнем слое почв локальной зоны воздействия в северном и восточном направлениях от комбината Североникель в 2001-2011 гг. в сотни, а Ni в тысячи раз превышала фоновые значения. В работе Ершова В.В. и др. [9, С. 131] показано, что выпадения приоритетных поллютантов из атмосферы и вынос их соединений с почвенными водами из всех генетических горизонтов в десятки (сульфаты) и в сотни (ТМ) раз выше, чем на фоновой территории. Многолетняя динамика (с 1993 г. по 2012 г.) показывает достоверные тренды снижения концентраций и выноса основных поллютантов.

#### Результаты и обсуждение

Для изученных ландшафтов сложно выбрать фоновые территории, так как весь Кольский полуостров подвержен сильному антропогенному воздействию. Даже на территории рядом с усадьбой Лапландского заповедника, которая находится на значительном расстоянии от комбината, наблюдаются очень высокие концентрации Ni и Cu. Территория ПАБСИ находится в стороне от изученного градиента и характеризуется другим минеральным составом горных пород. Исходя из вышеизложенного, в качестве норматива были взяты ОДК (ориентировочные допустимые концентрации), а также ПДК (предельно допустимые концентрации) валового содержания и подвижных форм химических веществ в почве.

По результатам анализа почвенных проб можно сказать, что для валового содержания Ni на всех площадках выявлены превышения норматива (табл. 2). Хорошо прослеживается закономерность распределения ТМ по градиенту в верхнем почвенном горизонте – от первого профиля содержание увеличивается и своего максимума достигает на расстоянии 8 км от комбината, где в верхнем горизонте валовое содержание Ni составляет в среднем – 3265 мг/кг, в горизонте В – 300 мг/кг. Минимальная концентрация подвижного Ni в горизонте О обнаружена на втором профиле и равна 7 мг/кг. Максимальная концентрация обнаружена на расстоянии 8 км, она равна 414 мг/кг. Среднее содержание подвижного Ni в горизонте О на всех площадках превышает ПДК (табл. 3). Концентрации Ni в горизонте В ниже, чем в горизонте О.

Таблица 2 – Среднее валовое содержание тяжелых металлов в верхних горизонтах почв Кольского полуострова О/В, мг/кг

Номер Профиля	N	Sc	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Cd	Ba	Pb
1	3	<u>10,2</u> 12,7	<u>75</u> 98	<u>474</u> 228	<u>617</u> 566	<u>32363</u> 38803	<u>72,1</u> 29,3	<u>930</u> 143	<u>394</u> 105	<u>53,4</u> 65,6	<u>0,47</u> 0,14	<u>242</u> 266	<u>21,3</u> 8,0
2	3	<u>14,9</u> 14,9	<u>128</u> 127	<u>647</u> 541	<u>834</u> 746	<u>47063</u> 55113	<u>126,9</u> 51,4	<u>229</u> 502	<u>473</u> 232	<u>55,7</u> 59,9	<u>0,28</u> 0,30	<u>276</u> 217	<u>26,2</u> 10,8
3	3	<u>4,7</u> 9,6	<u>62</u> 94	<u>39</u> 89	<u>406</u> 604	<u>14700</u> 38686	<u>7,7</u> 13,9	<u>58</u> 52	<u>27</u> 19	<u>35,8</u> 44,1	<u>0,29</u> 0,11	<u>319</u> 410	<u>35,6</u> 8,9
4	4	<u>10,0</u> 13,1	<u>118</u> 143	<u>238</u> 201	<u>2169</u> 1586	<u>38710</u> 51170	<u>306,0</u> 56,4	<u>3265</u> 300	<u>1474</u> 218	<u>80,6</u> 72,8	<u>1,60</u> 0,57	<u>216</u> 242	<u>42,9</u> 9,9
5	2	<u>2,3</u> 14,9	<u>29</u> 127	<u>46</u> 541	<u>229</u> 746	<u>11830</u> 55113	<u>80,8</u> 51,4	<u>1550</u> 502	<u>792</u> 232	<u>60,1</u> 59,9	<u>2,56</u> 0,30	<u>115</u> 217	<u>32,7</u> 10,8
7	3	<u>5,2</u> 11,8	<u>46</u> 89	<u>78</u> 147	<u>403</u> 661	<u>13977</u> 51100	<u>50,7</u> 20,3	<u>939</u> 72	<u>501</u> 36	<u>74,8</u> 82,0	<u>0,99</u> 0,12	<u>268</u> 425	<u>42,0</u> 12,7
6	3	<u>4,7</u> 15,7	<u>39</u> 121	<u>66</u> 153	<u>305</u> 814	<u>15003</u> 61215	<u>29,3</u> 26,3	<u>436</u> 55	<u>190</u> 20	<u>49,6</u> 66,4	<u>0,49</u> 0,10	<u>188</u> 334	<u>22,7</u> 10,0
ОДК/ ПДК	-	-	150	-	V+Mn= 100+ 1000	-	-	40	66	110	1,0	-	65

Примечание: в числителе указано валовое содержание металла в горизонте О, в знаменателе – в горизонте В; n - количество проб

Валовое содержание Cu в верхнем горизонте в несколько раз превышает содержание в иллювиальном горизонте на всех площадках (табл. 2). Значение концентрации Cu в почве в районе ПАБСИ является минимальным. На расстоянии 8 км от источника загрязнения средняя концентрация Cu в верхнем почвенном горизонте составляет 1474 мг/кг, максимальная – 3090 мг/кг. Максимальные концентрации Cu в горизонте В обнаружены на четвертом профиле (средняя – 218 мг/кг, наибольшая – 606 мг/кг). Превышения ПДК для подвижных форм Cu (3 мг/кг) выявлено на всех исследованных площадках в верхнем и иллювиальном горизонтах (табл. 3). На территории в районе ПАБСИ концентрации Cu минимальны, они незначительно превышают ПДК. Наибольшее количество подвижной Cu в верхнем горизонте наблюдается на расстоянии 8 км от комбината (средняя концентрация – 254 мг/кг, максимальная – 532 мг/кг). Здесь же и самая большая амплитуда между значениями подвижной формы Cu в верхнем и иллювиальном. По градиенту на юг от комбината прослеживается следующая закономерность накопления – концентрации растут от первого профиля и достигают максимума на четвертом профиле, далее они уменьшаются.

Таблица 3 – Среднее содержание подвижных форм тяжелых металлов в верхних горизонтах почв Кольского полуострова О/В, мг/кг

Номер профиля	N	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Cd	Ba	Pb
1	3	<u>0,21</u> 0,13	<u>2,28</u> 2,47	<u>93,13</u> 11,59	<u>133,13</u> 102,40	<u>3,59</u> 0,82	<u>37,60</u> 10,91	<u>58,53</u> 3,00	<u>9,83</u> 5,77	<u>0,72</u> 0,10	<u>20,54</u> 19,15	<u>4,13</u> 0,62
2	3	<u>0,10</u> 0,07	<u>3,23</u> 12,57	<u>21,74</u> 41,79	<u>132,17</u> 314,10	<u>0,80</u> 1,37	<u>18,39</u> 22,72	<u>71,83</u> 35,29	<u>3,07</u> 3,02	<u>0,04</u> 0,14	<u>4,01</u> 7,01	<u>2,70</u> 0,80
3	3	<u>0,33</u> 0,55	<u>0,15</u> 3,61	<u>199,9</u> 15,99	<u>25,21</u> 478,00	<u>0,48</u> 0,12	<u>2,29</u> 0,91	<u>4,05</u> 4,80	<u>15,10</u> 3,66	<u>0,28</u> 0,15	<u>18,35</u> 8,72	<u>6,11</u> 0,88
4	4	<u>0,63</u> 0,25	<u>1,42</u> 3,66	<u>434,8</u> 100,4	<u>278,33</u> 261,28	<u>9,00</u> 1,14	<u>145,3</u> 39,89	<u>254,0</u> 33,11	<u>8,40</u> 7,05	<u>0,73</u> 0,25	<u>12,45</u> 16,76	<u>3,90</u> 1,54
5	2	<u>0,23</u> 0,40	<u>0,26</u> 1,99	<u>44,89</u> 3,88	<u>98,60</u> 299,50	<u>5,74</u> 0,27	<u>80,45</u> 6,61	<u>42,55</u> 6,06	<u>19,73</u> 6,82	<u>1,01</u> 0,03	<u>15,38</u> 13,03	<u>4,66</u> 0,44
7	3	<u>0,14</u> 0,07	<u>0,08</u> 3,18	<u>90,18</u> 39,25	<u>12,88</u> 631,33	<u>2,14</u> 0,29	<u>22,64</u> 7,57	<u>17,81</u> 9,09	<u>23,53</u> 4,32	<u>0,55</u> 0,05	<u>21,42</u> 19,39	<u>4,67</u> 2,78
6	3	<u>0,06</u> 0,15	<u>0,05</u> 1,71	<u>57,25</u> 11,84	<u>7,23</u> 174,60	<u>0,97</u> 0,18	<u>16,96</u> 1,21	<u>11,67</u> 5,11	<u>16,52</u> 3,06	<u>0,17</u> 0,02	<u>11,61</u> 3,54	<u>3,46</u> 3,87
ПДК	-	-	6	60	-	5	4	3	23	-	-	6
Доля подвижных форм, %	-	0,1-0,8	0,1-0,5	2,6-49,2	0,1-0,8	0,6-7,1	2,4-8,0	3,6-17,2	5,5-33,3	14,3-96	1,5-13,4	9,1-19,4

Примечание: в числителе указано содержание подвижных форм металла в горизонте О, в знаменателе – в горизонте В; n - количество проб

Для валового содержания Co (табл. 2) максимум наблюдается в горизонте О на расстоянии 8 км (среднее – 306, максимальное 766 мг/кг). Содержания подвижного Co (табл. 3) на всех пробных площадках не превышают норматив,

за исключением площадок на четвертом (9 мг/кг) и пятом (6 мг/кг) профилях. На большинстве площадок концентрации Co в верхнем почвенном горизонте в несколько раз выше, чем в иллювиальном. В районе ПАБСИ концентрации Co минимальны.

Все полученные значения валового Cd на всех пробных площадках ниже ОДК (1 мг/кг), за исключением четвертого и пятого профилей. Прослеживается тенденция накопления Cd в верхнем почвенном горизонте. Для Cd концентрация подвижных форм в верхнем горизонте достигает максимума на пятом профиле.

Валовое содержание Zn в горизонте В превышает таковое в горизонте О на всех исследованных площадках. Максимум наблюдается на седьмом профиле. На большинстве площадок концентрации в верхнем почвенном горизонте подвижного Zn выше, чем в иллювиальном. Также значения подвижных концентраций не превышают норматив (23 мг/кг) за исключением площадки на водосборе реки Курка.

На всех исследованных площадках валовое содержание Fe в горизонте В больше, чем в горизонте О. Количество Fe увеличивается с удалением от комбината. Pb распределен по территории равномерно, его содержание не зависит от расстояния до комбината. Валовое содержание не превышает норматив.

Важным индикатором антропогенного загрязнения является доля подвижных форм ТМ от их валового содержания (табл.3). На исследованной территории V, Cr и Fe характеризуются низкой подвижностью (доля подвижных форм меньше единицы), средней подвижностью (до 10%) отличаются Co и Ni, повышенной (до 20%) – Cu и Pb, высокой (более 20%) – Zn, Mn и Cd. Увеличение подвижности в зоне воздействия комбината на четвертом и пятом профилях наблюдается для Ni, Cu, Co. Подвижность Mn и Zn максимальна в районе ПАБСИ.

По полученным концентрациям ТМ в почве были рассчитаны коэффициенты суммарного загрязнения. Почвы верхнего горизонта на всех площадках по градиенту на юг от комбината относятся к опасной категории загрязнения, на четвертом профиле – к чрезвычайно опасной категории. На территории Лапландского заповедника Zc почв верхнего горизонта указывает на умеренное загрязнение. Почвы иллювиального горизонта всех площадок относятся к допустимой категории загрязнения, второго профиля – к умеренно-опасной, так как верхний горизонт на этом профиле либо отсутствует либо идентифицируется как антропогенно-преобразованный горизонт X. В г. Кировск почвы верхнего и иллювиального горизонтов относятся к допустимой категории загрязнения.

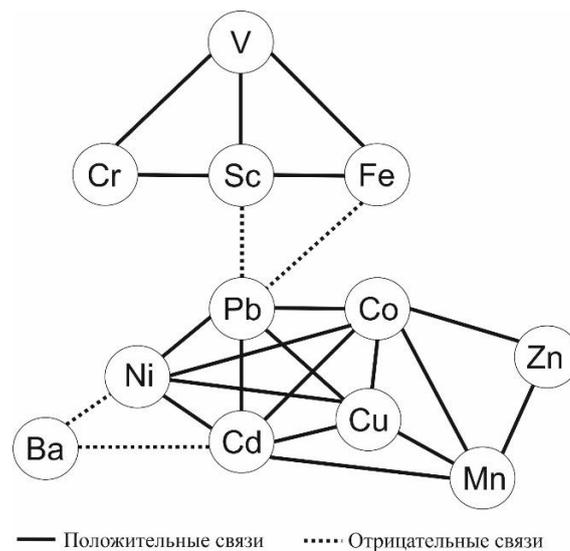


Рис. 1 – Корреляция между содержанием ТМ в почвах

Была рассчитана корреляция между содержанием химических элементов в почве. Четко выявлены две ассоциации химических элементов. Значимые положительные связи обнаружены между Cr, V, Fe и Sc, а также Ni, Cu, Cd, Pb, Co, Zn и Mn (рис.1).

#### Заключение

Почвы, в районе воздействия комбината Североникель подвержены антропогенному воздействию. На большинстве исследованных площадок значения концентрации ТМ значительно превышают нормативы. Среднее валовое содержание Ni превышает норматив в 80 раз, содержание подвижных форм Ni – в 40 раз; среднее валовое содержание Cu – в 22 раза, содержание подвижных форм Cu – в 85 раз.

Содержание ТМ в почвенных горизонтах на исследованных площадках значительно различается между собой. На площадках, расположенных на четвертом профиле, наблюдаются максимальные концентрации, как для подвижных форм, так и для валового содержания основных элементов – Ni, Cu, Co. Такие элементы как Mn, Fe, V на территории исследования распределены относительно равномерно.

Концентрации таких металлов как Ni, Cu, Co, Cd и Pb в О-горизонте выше, чем в В-горизонте. Это говорит о том, что данные металлы поступают преимущественно из атмосферы. Такие элементы как Sc, V и Fe в верхнем почвенном горизонте имеют минимальные концентрации.

По полученным концентрациям ТМ в почве были рассчитаны показатели суммарного загрязнения. Почвы верхнего горизонта на всех площадках относятся к опасной категории загрязнения, а на четвертом профиле – к чрезвычайно опасной категории. Почвы иллювиального горизонта – преимущественно к допустимой. В районе г. Кировск почвы верхнего и иллювиального горизонтов относятся к допустимой категории загрязнения. В целом

коэффициент суммарного загрязнения почв достоверно позволяет оценить комплексное загрязнение почв и соответствует картине распределения ТМ по территории.

По результатам расчета коэффициента корреляции между содержанием химических элементов выявлены две ассоциации химических элементов: первая – Ni, Cu, Cd, Pb, Co, Zn и Mn; вторая – Cr, V, Fe и Sc. Значимые положительные связи между элементами объединяют их по источнику поступления. Источник элементов первой ассоциации – преимущественно выбросы комбината, второй – горные породы.

Таким образом, с течением времени концентрации ТМ в почве в целом снижаются, что связано непосредственно с сокращением выбросов предприятием и проведением мероприятий в области охраны окружающей среды. Тем не менее, сохраняется высокое содержание поллютантов в почве и нарушение естественного геохимического цикла.

#### Финансирование

Статья подготовлена в рамках гранта РФФИ 18-05-00217 А «Биогеохимические индикаторы техногенной трансформации потоков тяжелых металлов в ландшафтах».

#### Конфликт интересов

Не указан.

#### Funding

The article was prepared under the RFBR grant 18-05-00217 A “Biogeochemical indicators of technogenic transformation of metal flows in objects”.

#### Conflict of Interest

None declared.

#### Список литературы / References

1. Государственный доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2017 году. Министерство природных ресурсов и экологии Мурманской области. Мурманск, 2018. – URL.: <https://mpr.gov-murman.ru> (дата обращения: 06.11.2019).

2. Опекунова М.Г. Мониторинг изменения состояния окружающей среды в зоне воздействия комбината «Североникель». Часть II. Миграция и аккумуляция химических элементов в почвах / М.Г. Опекунова, Е.Ю. Елсукова, Чекушин В.А. и др. Вестник СПбГУ, серия 7: геология, география, выпуск 3, 2006. С. 39-49.

3. Elsukova E. Technogenic transformation of heavy metal streams in the soils of the Kola Peninsula/ E. Elsukova, M. Opekunova, A. Opekunov // International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM – 2018. – Section: 13. Soils. – P. 511-517. DOI: 10.5593/sgem2018/3.2/S13.067

4. Елсукова Е.Ю. Содержание подвижных форм тяжелых металлов в почвах в зоне воздействия комбината «Североникель» / Е.Ю. Елсукова, Р.О. Таран // Антропогенная трансформация природной среды. 2015. - № 1. – Пермь – С. 170-173.

5. Саэт Ю.Е. Геохимия окружающей среды / Саэт Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П. и др. – М. Недра, 1990. – 335 с.

6. Никонов В.В. Рассеянные элементы в бореальных лесах / В.В. Никонов, Н.В. Лукина, В.С. Безель и др. Отв. ред. А.С. Исаев. – М.: Наука, 2004. – 616 с.

7. Сухарева Т.А. Пространственно-временная динамика микроэлементного состава хвойных деревьев и почвы в условиях промышленного загрязнения / Т.А. Сухарева // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2013. - № 6. – С. 19-28.

8. Кашулина Г.М. Мониторинг загрязнения почв тяжелыми металлами в окрестностях медно-никелевого предприятия на Кольском полуострове / Г.М. Кашулина // Почвоведение – 2018. - № 4. – С.493-505.

9. Ершов В.В. Оценка динамики состава почвенных вод северотаежных лесов при снижении аэротехногенного загрязнения выбросами медно-никелевого комбината / Ершов В.В., Лукина Н.В., Орлова М.А., Исаева Л.Г. и др. // Сибирский экологический журнал, 2019. – Т.26. - № 1. – С. 119-132.

#### Список литературы на английском языке /References in English

1. Gosudarstvennyj doklad o sostoyanii i ob okhrane okruzhayushhej sredy Murmanskoy oblasti v 2017 godu. Ministerstvo prirodnykh resursov i ehkologii Murmanskoy oblasti [State report on the state and protection of the environment of the Murmansk region in 2018. Ministry of Natural Resources and Ecology of the Murmansk Region] [Electronic resource] Murmansk, 2018. – URL.: <https://mpr.gov-murman.ru> (accessed: 06.11.2019) [in Russian]

2. Opekunova M.G. Monitoring izmeneniya sostoyaniya okruzhayushhej sredy v zone vozdeystviya kombinata «Severonikel'». Part II. Migratsiya i akumulyatsiya khimicheskikh ehlementov v pochvakh [Monitoring environmental changes in the impact area of the Severonickel plant. Part II Migration and accumulation of chemical elements in soils] / M.G. Opekunova, E.Yu. Elsukova, V.A. Chekushin V.A. et al // Vestnik SPbSU. Earth Sciences, issue 3, 2006. P. 39-49. [in Russian]

3. Elsukova E. Technogenic transformation of heavy metal streams in the soils of the Kola Peninsula/ E. Elsukova, M. Opekunova, A. Opekunov // International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM – 2018. – Section: 13. Soils. – P. 511-517. DOI: 10.5593/sgem2018/3.2/S13.067

4. Elsukova E.Yu. Soderzhanie podvizhnykh form tyazhelykh metallov v pochvakh v zone vozdeystviya kombinata «Severonikel'» [The content of mobile forms of heavy metals in soils in the impact zone of the Severonickel plant] / E.Yu. Elsukova, R.O. Taran // Antropogennaya transformatsiya prirodnoj sredy [Anthropogenic transformation of the natural environment]. – 2015. - № 1. – Perm' – P. 170-173. [in Russian]

5. Saet Yu.E. Geokhimiya okruzhayushhej sredy [Environmental geochemistry] / Saet Yu.E., Revich B.A., Yanin E.P. et al. – M. Nedra, 1990. – 335 p. [in Russian]

6. Nikonov V.V. Rasseyannye ehlementy v boreal'nykh lesakh [Scattered elements in boreal forests] / V.V. Nikonov, N.V. Lukina, V.S. Bezel' et al. Responsible editor A.S. Isaev. – M.: Nauka, 2004. – 616 p. [in Russian]

7. Sukhareva T.A. Prostranstvenno-vremennaya dinamika mikroehlementnogo sostava khvojnykh derev'ev i pochvy v usloviyakh promyshlennogo zagryazneniya / T.A. Sukhareva [Space-time microelement dynamics of coniferous trees and soil

under industrial pollution] // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Lesnoj zhurnal [News of higher educational institutions. Forest magazine]. – 2013. - № 6. – P. 19-28. [in Russian]

8. Kashulina G.M. Monitoring zagryazneniya pochv tyazhelymi metallami v okrestnostyakh medno-nikelevogo predpriyatiya na Kol'skom poluostrove [Monitoring of heavy metal soil pollution in the vicinity of the copper-nickel plant on the Kola Peninsula] / G.M. Kashulina // Pochvovedenie [Eurasian Soil Science] – 2018. - № 4. – P. 493-505. [in Russian]

9. Ershov V.V. Otsenka dinamiki sostava pochvennykh vod severotaezhnykh lesov pri snizhenii aehrotekhnogenogo zagryazneniya vybrosami medno-nikelevogo kombinata [Assessment of the dynamics of soil water composition in northern taiga forests while reducing aerotechnogenic pollution by emissions of a copper-nickel plant] / Ershov V.V., Lukina N.V., Orlova M.A., Isaeva L.G. et al // Sibirskij ehkologicheskij zhurnal [Siberian Journal of Ecology]. – 2019. – V. 26. - № 1. – P. 119-132. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.90.12.025>

## ГЛОБАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ КЛИМАТА С УЧЁТОМ УГЛЕРОДНОГО ЦИКЛА НАЗЕМНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

Научная статья

**Пархоменко В.П. \***

ORCID: 0000-0002-9963-0496,

Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана, Вычислительный центр им. А.А. Дородницына ФИЦ ИУ РАН, Москва, Россия

\* Корреспондирующий автор (vparhom[at]yandex.ru)

### Аннотация

Целью данной работы является построение глобальной гидродинамической модели климата с включением нового блока для расчета характеристик наземной растительности на основе цикла углерода. Блок растительности описывает продукционный процесс лесных экосистем в режиме сезонного хода климатических факторов. Установлено, что глобальные характеристики климатической системы выходят на установившейся режим за время около 2000 лет и модель устойчиво работает. Приведены временные и пространственные распределения полученных климатических характеристик и биогеохимического углеродного цикла наземной растительности.

**Ключевые слова:** углеродный цикл, глобальная климатическая модель.

## GLOBAL CLIMATE MODEL CONSIDERING CARBON CYCLE OF GROUND VEGETATION

Research article

**Parkhomenko V.P. \***

ORCID: 0000-0002-9963-0496,

Bauman Moscow State Technical University, Computer Center named after A.A. Dorodnitsyn, FRC IU RAS, Moscow, Russia

\* Corresponding author (vparhom[at]yandex.ru)

### Abstract

The goal of this work is to build a global hydrodynamic climate model with the inclusion of a new unit for calculating the characteristics of terrestrial vegetation based on the carbon cycle. The vegetation unit describes the production process of forest ecosystems in the seasonal mode of climatic factors. It is established that the global characteristics of the climate system are reaching their steady state over a period of about 2000 years and the model is working stably. The temporal and spatial distributions of the obtained climatic characteristics and the biogeochemical carbon cycle of terrestrial vegetation are presented.

**Keywords:** carbon cycle, global climate model.

### Введение

Представлена и интегрирована в модель климата минимальная пространственная модель динамики углерода наземной растительности, углерода в почве, влажности почвы и обмена энергией, влагой и углеродом с атмосферой. Эффективная численная схема процессов на земной поверхности предназначена для моделирования длительного периода времени (до тысяч лет) и больших ансамблевых расчетов совместно с глобальной климатической моделью промежуточной сложности [1], [2], [3]. Включает в себя параметризацию растительного покрова и параметра шероховатости поверхности как функции углерода наземной растительности, а также связь между запасами углерода почвы и влажностью почвы. Характеристики наземной растительности важны при моделировании климата, так как существенно влияют на интенсивность испарения, теплопередачи, поглощения солнечной радиации и поле ветра.

Целью данной работы является построение глобальной модели цикла углерода на достаточно точной конечно – разностной сетке 72 на 72 ячейки, описывающей продукционный процесс лесных экосистем, учитывающей сезонный ход климатических факторов и проведение совместных расчетов с моделью климата.

### Методы исследования и основные результаты

Рассматривается среднесуточная инсоляция с учетом ее сезонного хода. Для температуры поверхности суши принимается соотношение энергетического баланса в равновесном состоянии с учетом приходящей коротковолновой солнечной радиации на верхней границе атмосферы, атмосферного альбедо, скрытой теплоты, суммарного длинноволнового потока излучения и потока явного тепла [4], [5]. Параметризация для размера шероховатости поверхности вводится на основе данных об углероде растительности [5].

В каждой точке суши предполагается существование запаса влаги на текущий момент времени. Вода добавляется в почву за счет выпадения осадков и удаляется путем суммарного испарения и стока. Когда вода в почве превышает ее влагоемкость, избыток стекает в океан в соответствии с картой стоков [6]. Влагоемкость почвы имеет линейную зависимость от почвенного углерода. Такая формулировка - попытка описать различие между водоудерживающей способностью пустыни (низкий, близкий к нулю уровень углерода в почве) и болотных областей (высокие показатели почвенного углерода).

Углеродный цикл наземной растительности базируется на структуре, аналогичной [6], [7] с пересмотренными функциями для водного напряжения, опавших листьев осенью и температурными реакциями фотосинтеза, дыхания растений и почвенного дыхания.

В рассматриваемой модели на поверхности суши углерод может содержаться в растительности (представляющей

живую биомассу), или в почве (которая включает гумус и органический углерод в почве, но не неорганические карбонаты). Растительность поглощает углерод из атмосферы через фотосинтез и выделяет углерод в атмосферу в результате дыхания растений. Растительность также теряет углерод в почву через опавшие листья и почва выделяет углерод в атмосферу через почвенное дыхание. Зависимость фотосинтеза от влажности почвы линейна в определенных пределах.

Реакция фотосинтеза на температуру описывается функцией с двумя пиками, что обеспечивает хорошее согласование данных растительности и содержания почвенного углерода, без необходимости включать разные типы растительности высоких и низких широт. Дыхание растительности зависит от температуры воздуха и от количества биомассы [8]. Количество углерода, потерянного растительностью в почву через опавшие листья, связано с количеством углерода растительности. Потери углерода в атмосферу за счет дыхания почвы зависят от температуры поверхности и количества углерода в почвенном резервуаре. Альbedo земной поверхности определяется типом поверхности, и является функцией растительности и почвенного углерода.

В модели предполагается, что осадки в ячейке выпадают в виде снега, когда температура атмосферы меньше чем  $-5^{\circ}\text{C}$  [9], [10]. Снег имеет нулевую толщину и, следовательно, его альbedo не зависит от высоты снежного покрова. Снег сохраняется в ячейке, пока температура атмосферы не превышает  $-5^{\circ}\text{C}$ . В работе параметризуется только главный эффект альbedo снежного покрова и, следовательно, пренебрегается полным термодинамическим расчетом, который должен включать замерзание, плавление и сублимацию.

Настройка модели описана для размерности сетки  $36 \times 36$  в [2] и эти параметры использованы и в нашей реализации  $72 \times 72$ . Параметры углеродного цикла наземной растительности модели настроены для ситуации сохранения концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере в доиндустриальную эпоху 278 ppm. Для настройки были выбраны глобальные среднегодовые потоки углерода нетто-фотосинтеза, дыхания растительности, опавших листьев и дыхания почвы МГЭИК [7]. Модель размерности  $36 \times 36$  дает глобальные показатели 119.2 ГтС/год для фотосинтеза, 57.9 ГтС/год для дыхания растительности и 61.3 ГтС / год для лиственной подстилки и почвенного дыхания. Глобальная растительность и почвенный углерод равны 437 ГтС и 1317 ГтС, соответственно.

Глобальные параметры модели выходят на стационарный режим с однородных начальных условий за расчетный период в 2000 лет. Это показывают такие характеристики, как среднегодовые температура атмосферы, углерод растительности (см. рисунок 1), другие характеристики, усредненные по всей Земле.

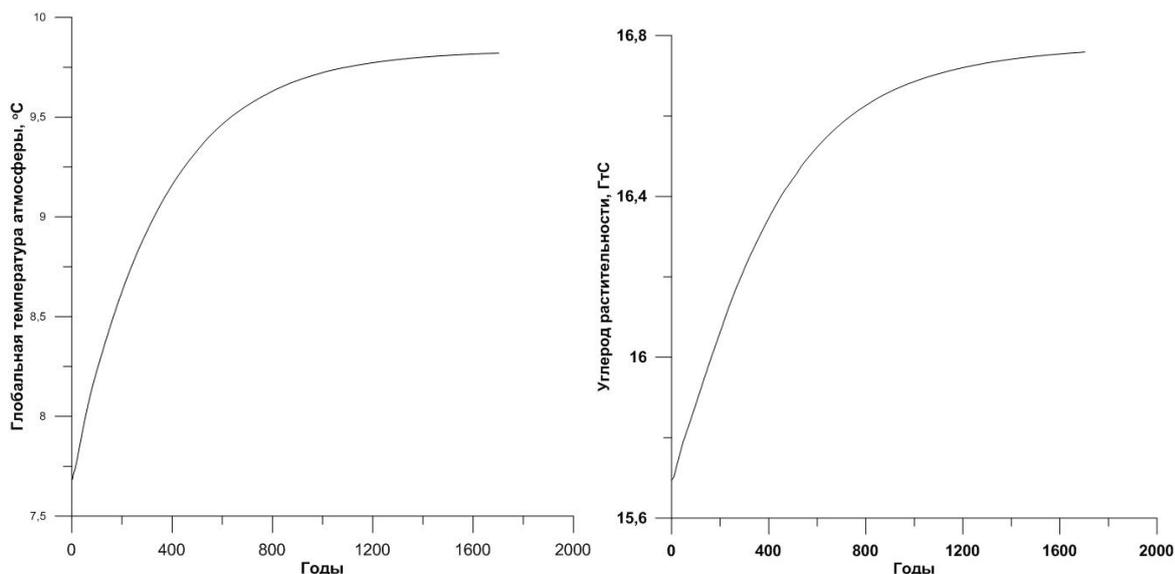


Рис. 1 – Изменение среднегодовой температуры атмосферы (слева) и углерода растительности (справа) за период 2000 лет

Согласно нашим результатам, распределение углерода растительности, характеризующего массу растительности на Земле, определяющее зону наиболее интенсивной растительности – это часть Южной и Северной Америки вблизи экватора и областями в средних широтах. Также наблюдаются два пика для растительности, соответствующие тропическим и бореальным лесам, что хорошо согласуется с результатами [3].

В блоке описания растительности рассчитывается также альbedo поверхности суши (см. рисунок 2), температура поверхности суши (см. рисунок 3) и влажности почвы (см. рисунок 4), которые используются собственно в модели климата.

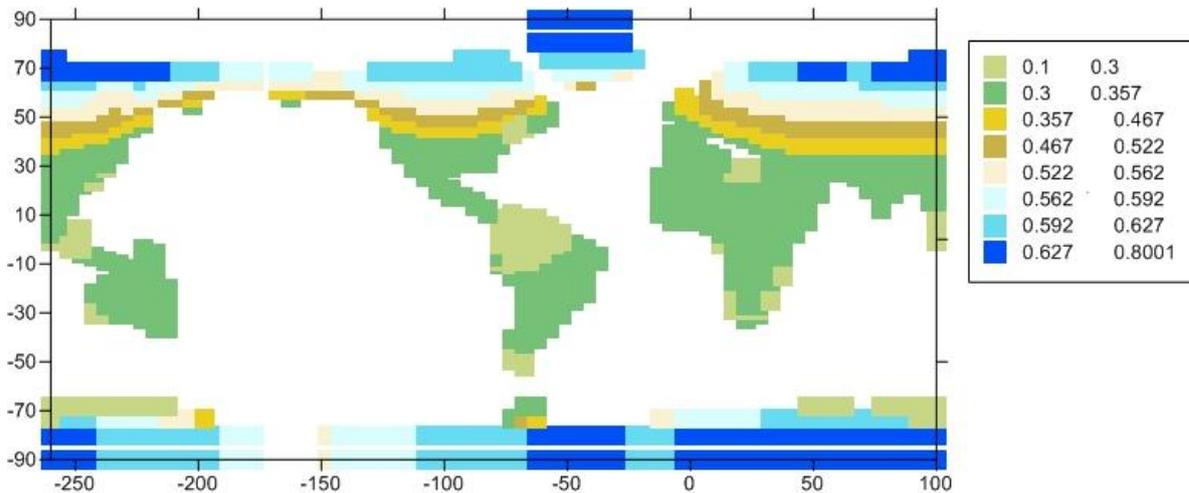


Рис. 2 – Среднегодовое распределение альbedo на поверхности суши

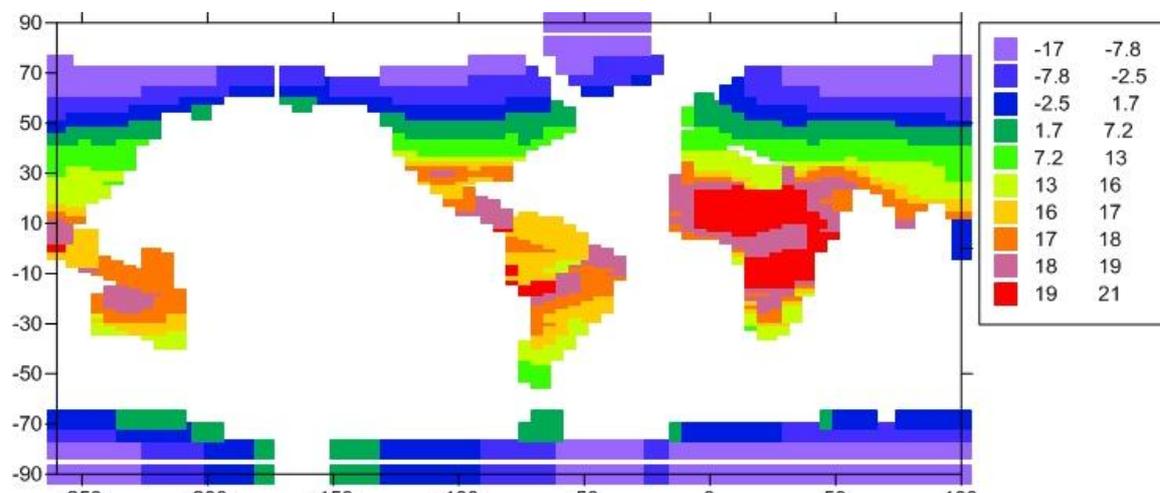


Рис. 3 – Среднегодовое распределение температуры поверхности суши

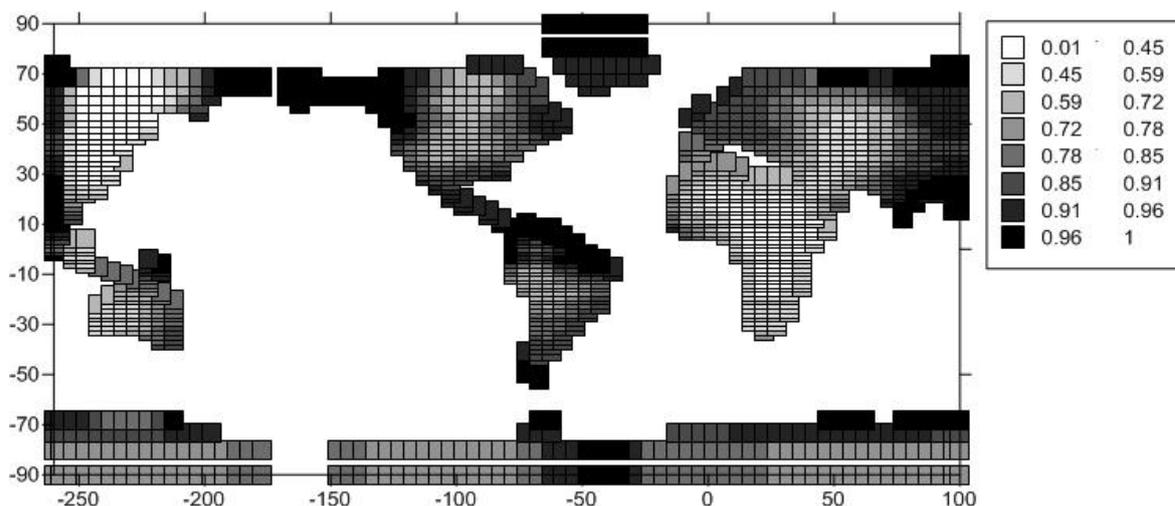


Рис. 4 – Среднегодовое распределение относительной влажности почвы

### Заключение

В настоящей работе с целью расширения и уточнения глобальной климатической модели, включающей энерго – влагобалансовую модель атмосферы и термохалинную модель мирового океана реализована глобальная модель биогеохимического цикла углерода на сетке 72 на 72 ячейки, описывающая продукционный процесс лесных экосистем и учитывающая сезонный ход климатических факторов.

Проведены численные расчеты по выходу совместной модели на установившейся режим. Установлено, что глобальные характеристики климатической системы выходят на этот режим за время около 2000 лет и модель устойчиво работает. Приведены временные и пространственные распределения полученных климатических характеристик и биогеохимического углеродного цикла наземной растительности. Согласно результатам, зона наиболее интенсивной растительности – часть Южной и Северной Америки вблизи экватора с небольшими областями

широт в 50 градусов. Также наблюдаются два максимума растительности, соответствующие тропическим и бореальным лесам, что согласуется с результатами более грубой модели.

#### Финансирование

Работа поддержана проектом РФФИ №17-01-00693.

#### Funding

This work was supported by the RFBR Project No. 17-01-00693.

#### Конфликт интересов

Не указан

#### Conflict of Interest

None declared.

#### Список литературы / References

1. Пархоменко В. П. Применение глобальных климатических моделей для исследования климата Земли. / В. П. Пархоменко //Труды Института системного анализа Российской академии наук (Труды ИСА РАН). – 2018. – Т. 68, №2. – С. 38–41.
2. Parkhomenko V.P. Modeling of global and regional climate response to solar radiation management./ Parkhomenko V.P. // IOP Journal of Physics: Conference Series. – 2018 – V.1141, 012057. – P. 1-5.
3. Williamson M. S. An efficient numerical terrestrial scheme (ENTS) for Earth system modelling. / Williamson M. S.; Lenton T. M.; Shepherd J. G., Edwards N. R.//Ecological Modelling. – 2006. – №198(3-4) – P. 362–374.
4. Muller, S. A. Water mass distribution and ventilation time scales in a cost-efficient, 3-dimensional ocean model. / Muller, S. A., Joos, F., Edwards, N. R., and Stocker, T. F. // J. Climate. – 2006. – V.19. – P. 5479–5499.
5. Olson J. S. Major world ecosystem complexes ranked by carbon in live vegetation. / Olson J. S., Watts J. A., Allison L. J. //Tech. Rep. NDP-017, Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory. – 1985. – Oak Ridge, Tennessee.
6. Edwards N. R. Uncertainties due to transport-parameter sensitivity in an efficient 3-D ocean-climate model./ Edwards N. R., Marsh R. //Climate Dynamics. – 2005. – V.24. – P. 415-433.
7. Lenton T. M. Land and ocean carbon cycle feedback effects on global warming in a simple. / Lenton T. M. //Earth system model. – Tellus. – 2000. – V.52B. – P.1159–1188.
8. Weaver A. J.The UVic earth system climate model: Model description, climatology, and applications to past, present and future climates. / Weaver A. J., Eby M., Weibe E. C., Bitz C. M., Duy P. B., Ewen T. L., Fanning A. F., Holland M. M., MacFadyen A., Matthews H. D., Meissner K. J., Saenko O., Schmittner A., Wang H., Yoshimori M. //Atmosphere-Ocean – 2001. – V.39(4), – P.361– 428.
9. Marsh R. Development of a fast climate model (C-GOLDSTEIN) for Earth System Science. / Marsh R., Edwards N.R., Shepherd J.G.// SOC. – 2002. – No.83. – 54 P.
10. IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. – 151 p.

#### Список литературы на английском языке / References in English

1. Parkhomenko V.P. Primenenie globalnyh klimaticheskikh modelej dlia issledovaniya klimata Zemli [The application of global climate models for the Earth climate study] / V.P. Parkhomenko //Trudy instituta systemnogo analiza Rossijskoj Akademii Nauk [Proceeding of the Institute for Systems Analysis of the Russian Academy of Science] – 2018. – V. 68, №2. – P. 38–41. [in Russian]
2. Parkhomenko V.P. Modeling of global and regional climate response to solar radiation management./ Parkhomenko V.P. // IOP Journal of Physics: Conference Series. – 2018 – V.1141, 012057. – P. 1-5.
3. Williamson M. S. An efficient numerical terrestrial scheme (ENTS) for Earth system modelling. / Williamson M. S.; Lenton T. M.; Shepherd J. G., Edwards N. R.//Ecological Modelling. – 2006. – №198(3-4) – P. 362–374.
4. Muller, S. A. Water mass distribution and ventilation time scales in a cost-efficient, 3-dimensional ocean model. / Muller, S. A., Joos, F., Edwards, N. R., and Stocker, T. F. // J. Climate. – 2006. – V.19. – P. 5479–5499.
5. Olson J. S. Major world ecosystem complexes ranked by carbon in live vegetation. / Olson J. S., Watts J. A., Allison L. J. //Tech. Rep. NDP-017, Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory. – 1985. – Oak Ridge, Tennessee.
6. Edwards N. R. Uncertainties due to transport-parameter sensitivity in an efficient 3-D ocean-climate model./ Edwards N. R., Marsh R. //Climate Dynamics. – 2005. – V.24. – P. 415-433.
7. Lenton T. M. Land and ocean carbon cycle feedback effects on global warming in a simple. / Lenton T. M. //Earth system model. – Tellus. – 2000. – V.52B. – P.1159–1188
8. Weaver A. J.The UVic earth system climate model: Model description, climatology, and applications to past, present and future climates. / Weaver A. J., Eby M., Weibe E. C., Bitz C. M., Duy P. B., Ewen T. L., Fanning A. F., Holland M. M., MacFadyen A., Matthews H. D., Meissner K. J., Saenko O., Schmittner A., Wang H., Yoshimori M. //Atmosphere-Ocean – 2001. – V.39(4), – P.361– 428.
9. Marsh R. Development of a fast climate model (C-GOLDSTEIN) for Earth System Science. / Marsh R., Edwards N.R., Shepherd J.G.// SOC. – 2002. – No.83. – 54 P.
10. IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. – 151 p.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.90.12.026>

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ОСЕВЫХ ЛИНИЙ ГОРНЫХ ЛЕДНИКОВ

Научная статья

**Рыбак О.О. \***

ORCID: 0000-0003-3923-7163,

Сочинский научно-исследовательский центр РАН, Сочи, Россия,

Филиал Института природно-технических систем, Сочи, Россия;

Институт водных проблем РАН, Москва, Россия,

\* Корреспондирующий автор (o.o.rybak[at]gmail.com)

### Аннотация

Прогностические расчеты изменений состояния горного оледенения эффективно осуществляются методами математического моделирования. Применение трехмерных моделей, учитывающих все виды напряжений, требует больших затрат вычислительных ресурсов, что создает объективные сложности при расчетах эволюции оледенения целых горных систем. Это определило рост интереса к относительно простым моделям, в том числе к одномерным, так называемым «flow-line models», то есть к моделям, имитирующим изменения характеристик ледников вдоль осевых линий. Осевые линии строятся либо, фактически, вручную, либо с применением достаточно сложных и затратных (полу-) автоматических методов. В настоящей статье предложен простой алгоритм построения осевых линий горных ледников для последующего использования в прогностических численных экспериментах. Алгоритм апробируется на нескольких горно-долинных ледниках различных конфигураций.

**Ключевые слова:** горный ледник, течение льда, осевая линия ледника.

## DETERMINING AXIAL LINES POSITION OF MOUNTAIN GLACIERS

Research article

**Rybak O.O. \***

ORCID: 0000-0003-3923-7163,

Sochi Research Center of the Russian Academy of Sciences, Sochi, Russia;

Branch of Institute of Natural and Technical Systems, Sochi, Russia;

Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

\* Corresponding author (o.o.rybak[at]gmail.com)

### Abstract

The paper presents predictive calculations of changes in the state of mountain glaciation based on the mathematical modeling methods. The use of three-dimensional models that take into account all types of stresses requires large computational resources, which creates objective difficulties in calculating the evolution of the glaciation of entire mountain systems. This has determined the growing interest in relatively simple models, including one-dimensional, so-called “flow-line models”, that is, models that simulate changes in the characteristics of glaciers along the centerlines. Axial lines are built either, in fact, manually, or using fairly complex and costly (semi-) automatic methods. This article proposes a simple algorithm for constructing the axial lines of mountain glaciers for subsequent use in predictive numerical experiments. The algorithm was tested on several mountain-valley glaciers of various configurations.

**Keywords:** mountain glacier, ice flow, glacial centerline.

### Введение

Горное оледенение играет важную роль в стабильном снабжении водой обширных прилегающих территорий. Существуют разные оценки вклада талой ледниковой воды в общий речной сток, которые варьируются от региона к региону. В условиях меняющегося климата состояние горного оледенения вызывает обоснованное беспокойство, о чем косвенно свидетельствует рост числа публикаций, посвященных оценкам изменения характеристик оледенения за последние несколько десятков лет и их прогнозу. Очевидно, что объективные проекции изменений параметров оледенения возможно построить только применяя методы математического моделирования. Парадокс заключается в том, что усложнение математических моделей, в конечном итоге, снижает возможности их применения из-за роста затрат на вычисления, которое опережает рост производительности компьютеров. Последнее обстоятельство определило рост интереса к относительно простым моделям, в том числе к одномерным, так называемым «flow-line models», то есть к моделям, имитирующим изменения характеристик ледников вдоль осевых линий [1]. Особый интерес представляет работа [2], в которой даны прогностические оценки изменений ледникового стока для более, чем половины горно-ледниковых бассейнов планеты. Для расчетов была использована упрощенная модель [3], которая при всех допущениях позволила сделать достаточно объективную оценку изменений параметров оледенения в рассматриваемых бассейнах до конца текущего столетия. Используя модифицированную версию модели [3], авторы работы [4] дали детальный прогноз изменения всех ледников Альп. Одной из ключевых задач применения простых моделей [1], [2], [4] является определение осевых линий ледников, вдоль которых рассчитываются изменения толщины льда. Алгоритм расчетов эволюции ледников [5], впоследствии подвергшийся неоднократным усовершенствованиям, базируется на заданном положении осевых линий. Сами же детали процедуры расчета положения осевых линий в процитированных работах не приводятся. Существует несколько алгоритмов различной сложности для подобных расчетов [7], [8], [9], однако их реализация в виде программного кода достаточно трудоемка, особенно если учесть те требования, которые обусловлены конкретными условиями нашего исследования –

совместимостью с уже существующими процедурами (в частности, расчета баланса массы и течения льда), написанными на языке ФОРТРАН относительно ранних версий (90/95) (и, соответственно, имеющимися ограничениями на выполнение тех или иных операций).

Одна из конечных целей нашего исследования заключается в более точном, чем это было сделано в [2], прогнозе изменений ледникового стока на длительную перспективу. Для этого потребовалось модифицировать базовую модель [3], в частности, включить в нее описание теплообмена участков ледников, покрытых моренным чехлом, что актуально, например для Кавказа [10], и чем пренебрегают авторы работ [2], [3], [4]. Первым шагом в достижении поставленной цели является полуавтоматическое построение осевых линий и интерактивном режиме, чему, собственно, посвящена настоящая статья. Ключевая идея определения положения осевых линий – через расчет «штрафной функции» («penalty function») взята нами из работы [7], однако, сама методика расчетов, адаптированная к задачам нашего исследования, полностью оригинальна. Заметим, что банальная, казалось бы, с геометрической точки зрения задача на самом деле не является такой в случае дискретного представления как контуров ледника, так и осевых линий на регулярной пространственной сетке.

Валидация разработанного алгоритма произведена на нескольких ледниках различных конфигураций.

### Описание алгоритма и его тестирование

Для разработки алгоритма нахождения осевых линий ледников необходимо, естественно, дать определение того, что, собственно, нужно найти. В конечно-разностном представлении граница ледника и его осевые линии представляют собой набор точек. На регулярной пространственной сетке расстояние между соседними точками одинаковое. Следовательно, осевая линия ледника должна представлять собой набор узлов регулярной сетки, расстояние от которых до точек, расположенных на внешнем контуре ледника, минимально. Очевидно, что для подавляющего числа точек минимальное расстояние от осевой линии до границы ледника будет находиться на нормали, проходящей через данную точку на осевой линии. Однако в прифронтовой области, где расстояние до языка ледника меньше, чем его ширина, это условие, естественно, нарушается.

Воспользуемся простой процедурой, описанной в [7], и модифицированной для нашей задачи. Задача решается в три этапа, каждый из которых состоит из следующих шагов. Этап первый:

1. Определение набора граничных точек.

2. Сглаживание контура ледника. Сглаживание сводится к удалению граничных точек, которые в дальнейшем не позволят провести автоматическую сквозную нумерацию.

3. Последовательная нумерация оставшихся точек. Для этого применяется следующий простой алгоритм. Мы исходим из того, что линия, огибающая ледник, не может ветвиться, соответственно, каждая точка на контуре может граничить только с двумя окружающими – с предшествующей и последующей.

4. Первой граничной точке присваивается №1, и эта точка исключается из дальнейшего рассмотрения. Далее перебираются восемь окружающих ее точек. Той из них, которая оказывается граничной, присваивается №2, точка помечается, - на этом текущий цикл перебора прерывается, новый цикл начинается с точки №2 и процедура повторяется. Для того, чтобы процесс не прерывался, необходимо выполнить описанный выше третий шаг. В результате получаем последовательность граничных точек.

5. Определение координат максимумов и минимумов высоты поверхности на контуре ледника, то есть точек старта и финиша осевых линий. Очевидно, что конечным должен быть узел сетки, где абсолютная высота поверхности ледника минимальна. В случае, если речь идет об одном леднике долинного типа, то эта точка будет единственной, и определить ее положение не представляет труда. В случае, если речь идет о ледниковом комплексе, например, о ледниковом комплексе Эльбруса, который состоит из более, чем двух десятков ледников, число таких точек, естественно, будет не меньше числа ледников, входящих в ледниковый комплекс. Другой пример – ледник Джанкуат на северном склоне Главного Кавказского хребта, имеющий общую область питания с ледником Лекзыр на южном склоне. В случае, если рассматривать эти два ледника как единый комплекс, речь должна идти о нахождении нескольких локальных минимумов высоты поверхности, расположенных на контуре ледников, из которых состоит комплекс. Кроме того, в двух приведенных примерах алгоритм поиска локальных максимумов, то есть точек начала осевых линий будет отличаться от соответствующего алгоритма для горно-долинных ледников. В последнем случае он будет относительно более простым: последовательный перебор всех узлов на контуре ледника и сравнение высоты в очередном узле с высотами в точках, расположенных справа и слева на расстоянии  $n$  шагов. Выбор  $n$ , по всей видимости, достаточно произволен. С одной стороны,  $n$  не может быть слишком маленьким, чтобы избежать ложных максимумов, и слишком большим, что, наоборот, может привести к потере реальных максимумов. Предварительные расчеты показали, что при  $n=5-10$  при пространственном разрешении 25 м число найденных локальных максимумов остается неизменным. Тем не менее, диапазон  $n$ , при котором число найденных максимумов остается неизменным, может быть иным при другом пространственном разрешении или при более сложной конфигурации ледников, чем тех, что были исследованы в настоящей работе.

На втором этапе в каждом узле сетки  $i$ , занятой льдом, рассчитаем так называемую «штрафную» функцию («penalty function» [7]):

$$P_i = \left[ \frac{\max(d) - d_i}{\max(d)} \cdot f_1 \right]^a + \left[ \frac{z - \min(z)}{\max(z) - \min(z)} \cdot f_2 \right]^b \quad (1)$$

где  $d_i$  – евклидово расстояние от узла сетки  $i$  до ближайшей точки на контуре ледника,  $\max(d)$  – максимальное евклидово расстояние от какого-либо узла до ближайшей точки на контуре,  $\max(z)$  и  $\min(z)$  – максимальная и минимальная абсолютная высота ледника. Множители  $f_1$  и  $f_2$  предназначены для перерасчета безразмерных нормированных величин к масштабу реальных ледников. Выбор этих множителей зависит от геометрических

характеристик конкретного ледника. Их значения несущественно меняются для ледников, схожих по размеру, поэтому для единообразия и сопоставимости результатов будем использовать значения для ледника Марух  $f_1 = 525$  и  $f_2 = 633$  в качестве постоянных ( $f_1$  – максимальное расстояние от узла сетки до ближайшей точки на контуре ледника,  $f_2$  – максимальный перепад высот на леднике). Параметры  $a$  и  $b$  определяют относительный вклад расстояния до границы и абсолютной высоты в значения штрафной функции (табл. 1). Выбор значений этих параметров, точнее их соотношение, определяет возможность прокладки осевой линии на отдельных участках ледника, что поясняется на примерах ниже.

В отличие от [7], в дальнейшем будем использовать два типа штрафных функций – полную ( $P_1$ ) – как определено в ур. (1) и сокращенный вариант последней ( $P_2$ ) – только первую часть правой части ур. (1). Заметим, что использованные в настоящей работе значения  $a$  и  $b$  отличаются от тех, которые предложены в [7] (см табл. 1)

До начала расчета штрафной функции выполним пространственное сглаживание поля высоты поверхности ледника, чтобы нивелировать локальные депрессии или возвышенности различного генезиса на поверхности ледника, которые могут в дальнейшем помешать прокладке осевых линий. Пример подобной локальной депрессии показан на рис. 1.



Рис. 1 – Локальная депрессия на леднике Бордуу (массив Ак-Шийрак, Внутренний Тянь-Шань)

*Примечание: масштабы депрессии сопоставимы с шагом пространственной сетки, и могут повлиять на траекторию осевой линии, если не провести пространственного осреднения поля высоты поверхности ледника*

На третьем этапе происходит построение осевых линий, которое начинается из найденных точек максимумов высоты поверхности и, параллельно, из точки (или точек) минимума. Как было упомянуто ранее, под линией в данном случае мы подразумеваем набор точек регулярных узлов пространственной сетки. Все линии строятся последовательно. То есть каждая следующая точка линии,  $k+1$ , выбирается из множества точек, окружающих точку  $k$ . Исключая из множества возможных точек точку  $k-1$ , получаем, что число возможных направлений  $m$  продолжения осевой линии не превышает семи. Условием выбора точки  $k+1$  является минимум штрафной функции в выбранной точке. Поскольку штрафная функция зависит от двух переменных – расстояния от контура ледника и от абсолютной высоты – очевидно, что выбранная точка  $k+1$  должна быть ниже по течению. В случае, если значение штрафной функции в выбранной точке  $k+1$  выше, чем в точке  $k$ , что возможно в случае, если точка  $k$  попала в локальный минимум штрафной функции, это потенциально грозит образованием замкнутого цикла выбора очередной точки, и продолжение осевой линии «застревает» на определенном наборе точек. Образование замкнутого цикла преодолевается двумя способами:

- использованием в локальном минимуме штрафной функции усеченного варианта  $P_2$  (см. ур. (1));
- использование в интерактивном режиме иного набора параметров  $a$  и  $b$ .

Последовательность расчетов проиллюстрируем на примере ледника Марух (Западный Кавказ), конфигурация которого относительно проста. На рис. 2: (а) определение узлов, пространственной сетки, соответствующих внешнему контуру ледника; красный квадрат обозначает положение узла с минимальной высотой; на врезке – красные точки обозначают узлы, исключенные из контура; (б) красными изолиниями показана штрафная функция с минимальными значениями вдоль предполагаемых осевых линий; красные кружки указывают на положения узлов сетки с локальными максимумами высоты – стартовых точек осевых линий; черные квадраты соответствуют найденным точкам на осевых линиях, начинающихся из точек максимума («течение вниз по склону»); коричневые кружки

соответствуют найденным точкам на осевой линии, берущей начало из точки минимума («вверх по склону»); (в) итоговая линия показана зеленым цветом, синим цветом выделена точка, где пересекаются конечные точки линий, берущих начало из точек максимума и минимума.

Конфигурация ледника Сары-Тор (массив Ак-Шийрак, Внутренний Тянь-Шань) несколько более сложна, однако разработанный алгоритм хорошо работает и в этом случае (рис. 3).

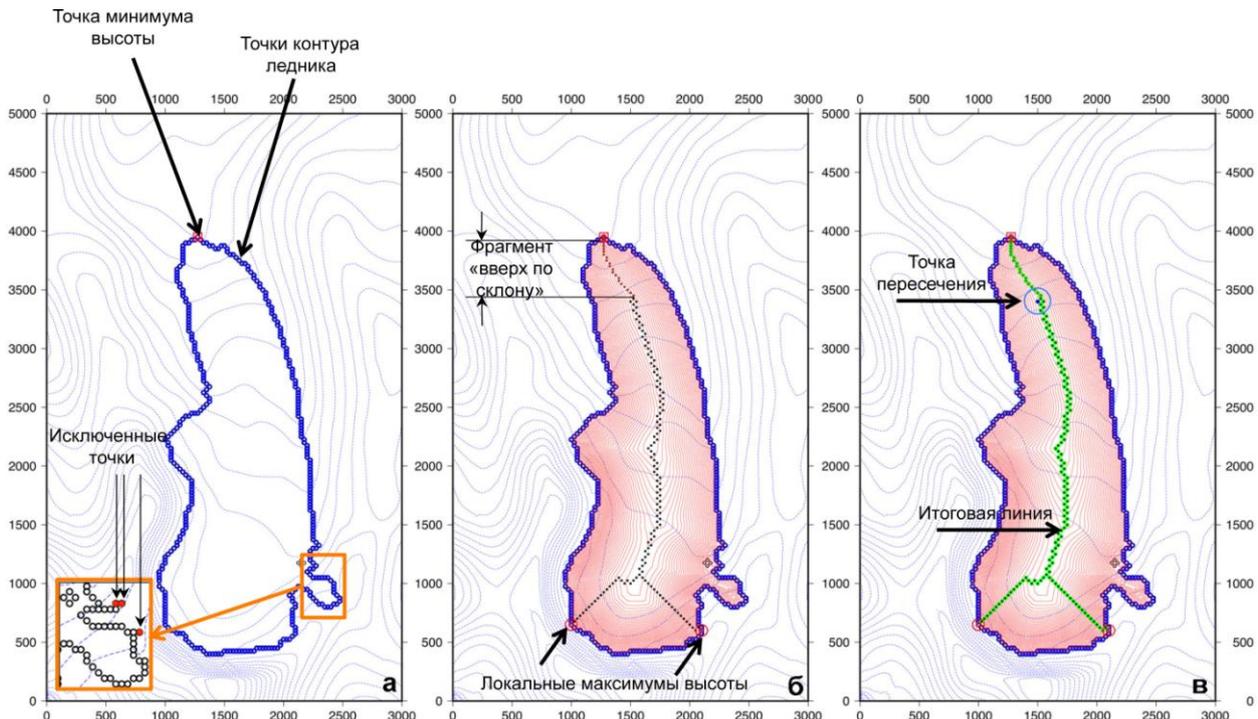


Рис. 2 – Этапы построения осевых линий (на примере ледника Марух, Центральный Кавказ)

Примечание: боковая оцифровка соответствует расстоянию в метрах от условной точки. Синим выделены изолинии абсолютной высоты. Остальные пояснения даны в тексте

Тестирование алгоритма на леднике Джанкуат с более сложной, чем у ледника Сары-Тор конфигурацией (рис. 4), показало, что оптимальное сочетание параметров  $a$  и  $b$  в ур. (1) будет разным на разных участках ледника. В связи с этим представляется разумным строить осевые линии не одновременно для всех вершин и для одного и того же набора параметров, а в интерактивном режиме подбирать оптимальное их сочетание для отдельных точек старта.

Очевидно, что при  $a=2,0$  и  $b=2,0$  осевая линия, проходящая по Джантуганскому фирновому плато, «застревает» в области, где штрафная функция имеет локальный минимум (рис. 4а).

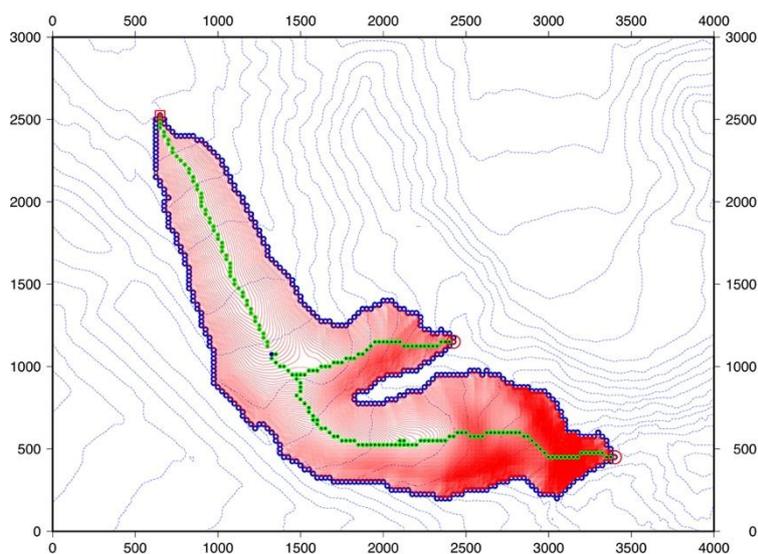


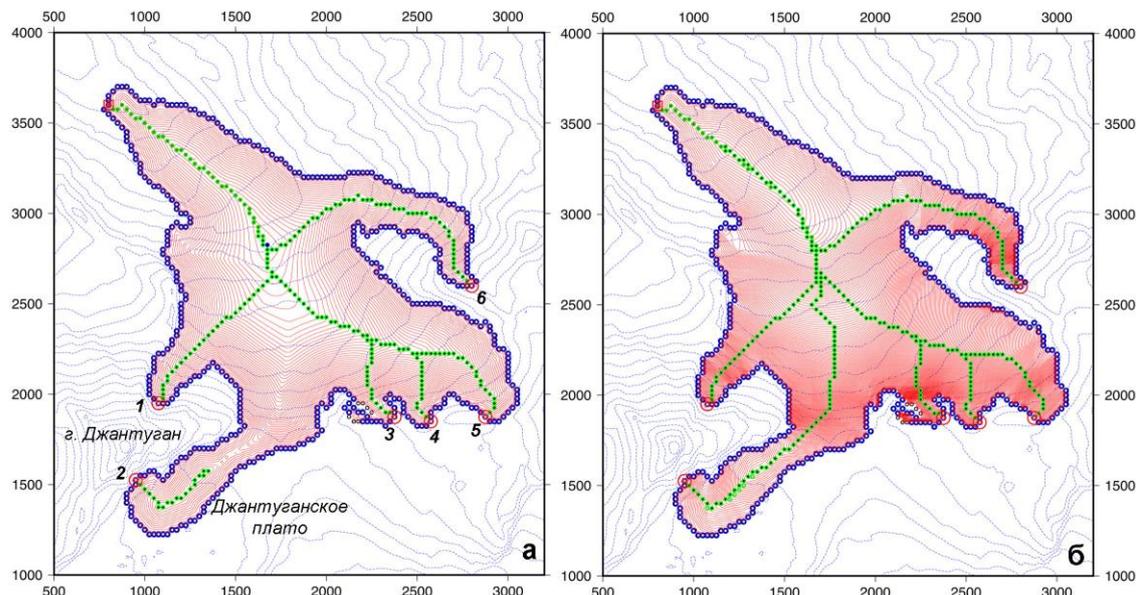
Рис. 3 – Осевые линии на леднике Сары-Тор (массив Ак-Шийрак, Внутренний Тянь-Шань)

Примечание: обозначения как на рис. 1

Для того, чтобы преодолеть его необходимо, чтобы вклад абсолютной высоты в штрафную функцию (см. ур. 1) превышал вклад от расстояния до границы ледника ( $a=2,0$  и  $b=2,3$  – рис. 4б). Заметим, что в последнем случае, остальные осевые линии будут нереалистичны.

Таблица 1 – Значения параметров  $a$  и  $b$  в уравнении (1) для отдельных ледников (участков ледников)

Параметр	Марух	Сары-Тор	Джанкуат (оси 1, 3-6)	Джанкуат (ось 2)
$a$	2,0	2,0	2,0	2,0
$b$	2,0	2,4	2,0	2,3

Рис. 4 – Осевые линии на леднике, проведенные с использованием различных наборов параметров  $a$  и  $b$  в ур. (1) Джанкуат (Центральный Кавказ)

Примечание: цифрами пронумерованы локальные максимумы абсолютной высоты, в которых берут начало осевые линии (а). Остальные обозначения как на рис. 1. Подробные пояснения даны в тексте

#### Заключительные замечания

В статье был рассмотрен простой алгоритм полуавтоматической прокладки осевых линий горных ледников. Процедура прокладки осевых линий является ключевой для расчета характеристик ледника в упрощенных математических моделях, интерес к которым значительно вырос из-за того, что последние стали активно применяться для расчетов и прогнозов состояния горного оледенения и объемов ледникового стока в масштабах целых горных систем. В дальнейшем мы предполагаем автоматизировать процедуру построения отдельных суб-бассейнов в рамках одного ледника, и перейти к процедуре собственно динамического моделирования.

#### Конфликт интересов

Не указан.

#### Conflict of Interest

None declared.

#### Список литературы / References

1. Maussion F. The Open Global Glacier Model (OGGM) v1.1 / F. Maussion, A. Butenko, N. Champollion et. al. // Geoscientific Model Development. – 2019. – V. 12. – P. 909-931. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-909-2019>.
2. Huss M. Global-scale hydrological response to future glacier mass loss / M. Huss, R. Hock // Nature Climate Change. – 2018. – V. 8. – P. 135-140. DOI:10.1038/s41558-017-0049-x.
3. Huss M. A new model for global glacier change and sea-level rise [Электронный ресурс] / M. Huss, R. Hock // Frontiers in Earth Science. – 2015. – V. 3. – Article 54. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/feart.2015.00054/full>. Article 54. DOI:10.3389/feart.2015.00054 (дата обращения 01.10.2019)
4. Zekollari H. Modelling the future evolution of glaciers in the European Alps under the EURO-CORDEX RCM ensemble / H. Zekollari, M. Huss, D. Farinotti // The Cryosphere. – 2019. – V. 13. – P. 1125-1146. <https://doi.org/10.5194/tc-13-1125-2019>.
5. Farinotti D. A method to estimate the ice volume and ice-thickness distribution of alpine glaciers / D. Farinotti, M. Huss, A. Bauder et al. // Journal of Glaciology. – V. 55(191). – P. 422-430.
6. Huss M. Future high-mountain hydrology: a new parameterization of glacier retreat / M. Huss, G. Jouviet, D. Farinotti, A. Bauder // Hydrology and Earth System Sciences. – 2010. – V. 14. – P. 815-829. DOI:10.5194/hess-14-815-2010.
7. Kienholz C. A new method for deriving glacier centerlines applied to glaciers in Alaska and northwest Canada / C. Kienholz, J.L. Rich, A.A. Arendt, R. Hock R. // The Cryosphere. – 2014. – V. 8. – P. 503-519. DOI:10.5194/tc-8-503-2014
8. Le Bris R. An automatic method to create flow lines for determination of glacier length: A pilot study with Alaskan glaciers / R. Le Bris, F. Paul // Computers & Geosciences. – 2013. – V. 52(3). – P. 234-245. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.10.014>
9. Le Moine N. A graph-based approach to glacier flowline extraction: an application to glaciers in Switzerland / N. Le Moine, P.-S. Gsell // Computers & Geosciences. – 2015. – V. 85(A). – P. 91-101. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2015.09.010>

10. Поповнин В.В. Разрастание поверхностной морены на языке ледника Джанкуат за период прямого гляциологического мониторинга / В.В. Поповнин, А.А. Резепкин, Л.Г. Тиелидзе // Криосфера Земли. – 2015. – Т. 19. – №1. – С. 89-98.

**Список литературы на английском языке / References in English**

1. Maussion F. The Open Global Glacier Model (OGGM) v1.1 / F. Maussion, A. Butenko, N. Champollion et. al. // Geoscientific Model Development. – 2019. – V. 12. – P. 909-931. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-909-2019>.

2. Huss M. Global-scale hydrological response to future glacier mass loss / M. Huss, R. Hock // Nature Climate Change. – 2018. – V. 8. – P. 135-140. DOI:10.1038/s41558-017-0049-x.

3. Huss M. A new model for global glacier change and sea-level rise / M. Huss, R. Hock // Frontiers in Earth Science. – 2015. – V. 3. – Article 54. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/feart.2015.00054/full>. Article 54. DOI:10.3389/feart.2015.00054 (accessed 01.10.2019)

4. Zekollari H. Modelling the future evolution of glaciers in the European Alps under the EURO-CORDEX RCM ensemble / H. Zekollari, M. Huss, D. Farinotti // The Cryosphere. – 2019. – V. 13. – P. 1125-1146. <https://doi.org/10.5194/tc-13-1125-2019>.

5. Farinotti D. A method to estimate the ice volume and ice-thickness distribution of alpine glaciers / D. Farinotti, M. Huss, A. Bauder et al. // Journal of Glaciology. – V. 55(191). – P. 422-430.

6. Huss M. Future high-mountain hydrology: a new parameterization of glacier retreat / M. Huss, G. Jouviet, D. Farinotti, A. Bauder // Hydrology and Earth System Sciences. – 2010. – V. 14. – P. 815-829. DOI:10.5194/hess-14-815-2010.

7. Kienholz C. A new method for deriving glacier centerlines applied to glaciers in Alaska and northwest Canada / C. Kienholz, J.L. Rich, A.A. Arendt, R. Hock R. // The Cryosphere. – 2014. – V. 8. – P. 503-519. DOI:10.5194/tc-8-503-2014

8. Le Bris R. An automatic method to create flow lines for determination of glacier length: A pilot study with Alaskan glaciers / R. Le Bris, F. Paul // Computers & Geosciences. – 2013. – V. 52(3). – P. 234-245. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.10.014>

9. Le Moine N. A graph-based approach to glacier flowline extraction: an application to glaciers in Switzerland / N. Le Moine, P.-S. Gsell // Computers & Geosciences. – 2015. – V. 85(A). – P. 91-101. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2015.09.010>

10. Popovnin V.V. Razrastanie poverhnostnoj moreny na yazyke lednika Dzhankuat za period pryamogo glyaciologicheskogo monitoringa [Superficial moraine expansion on the Djankuat glacier snout over the direct glaciological monitoring period] / V.V. Popovnin, A.A. Rezepkin, L.G. Tielidze // Kriosfera Zemli. – 2015. – V. 19. – No 1. – P. 89-98. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.90.12.027>

## ОЖИДАЕМОЕ ИЗМЕНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО БАЛАНСА МАССЫ ЛЕДНИКОВОГО КОМПЛЕКСА ЭЛЬБРУСА В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ

Научная статья

Рыбак О.О.<sup>1,\*</sup>, Рыбак Е.А.<sup>2</sup>, Корнева И.А.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ORCID: 0000-0003-3923-7163;

<sup>2</sup> ORCID: 0000-0003-3920-4176;

<sup>3</sup> ORCID: 0000-0002-6453-8315;

<sup>1,2</sup> Сочинский научно-исследовательский центр РАН, Сочи, Россия;

<sup>1,2,3</sup> Филиал Института природно-технических систем, Сочи, Россия;

<sup>1</sup> Институт водных проблем РАН, Москва, Россия;

<sup>3</sup> Институт глобального климата и экологии им. академика Ю.А. Израэля, Москва, Россия

\* Корреспондирующий автор (o.o.rybak[at]gmail.com)

### Аннотация

Площадь ледникового комплекса Эльбруса, который состоит из 24 ледников, составляет в настоящее время около 10% площади оледенения всего Кавказа. Изменения климата оказывали значительное влияние на параметры оледенения Эльбруса в течение последнего столетия. Учитывая ощутимый вклад талой воды ледников Эльбруса в общий речной сток в горных и предгорных регионах Северного Кавказа и его стабилизирующую роль, становится понятным интерес исследователей к прогностическим расчетам поверхностного баланса массы и ледникового стока. В настоящей статье мы исследуем указанные параметры оледенения при реализации экстремального климатического сценария RCP8.5 к концу текущего столетия. Показано, в частности, что одновременное увеличение приземной температуры воздуха, суммарной солнечной радиации и сокращение осадков, рассчитанные на модели глобального климата и приведенные к региону Центрального Кавказа, будут причиной существенного отступления снеговой линии и сокращения площади аккумуляции, что будет причиной усиливающейся деградации оледенения Эльбруса в грядущие годы.

**Ключевые слова:** горный ледник, Кавказ, Эльбрус, поверхностный баланс массы, ледниковый сток, математическая модель, численный эксперимент, прогноз.

## EXPECTED CHANGE IN SURFACE BALANCE OF MASS IN GLACIUM COMPLEX OF ELBRUS UNDER CONDITIONS OF GLOBAL WARMING

Research article

Rybak O.O.<sup>1,\*</sup>, Rybak E.A.<sup>2</sup>, Korneva I.A.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ORCID: 0000-0003-3923-7163;

<sup>2</sup> ORCID: 0000-0003-3920-4176;

<sup>3</sup> ORCID: 0000-0002-6453-8315;

<sup>1,2</sup> Sochi Research Center, Russian Academy of Sciences, Sochi, Russia;

<sup>1,2,3</sup> Branch of the Institute of Natural Technical Systems, Sochi, Russia;

<sup>1</sup> Institute for Water Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>3</sup> Institute for Global Climate and Ecology named after Yu. A. Israel, Moscow, Russia

\* Corresponding author (o.o.rybak[at]gmail.com)

### Abstract

The area of the Elbrus glacier complex, which consists of 24 glaciers, currently makes up about 10% of the glaciation area of the entire Caucasus. Climate change has a significant impact on the parameters of the glaciers of Elbrus over the past century. Given the tangible contribution of meltwater from Elbrus glaciers to the total river flow in the mountain and foothill regions of the North Caucasus and its stabilizing role, the interest of researchers in the prognostic calculations of the surface mass balance and glacial runoff becomes clear. In this paper, the authors examine the indicated glaciation parameters during the implementation of the extreme climatic scenario RCP8.5 by the end of this century. It was shown, in particular, that a simultaneous increase in surface air temperature, total solar radiation and a decrease in precipitation calculated on the global climate model and reduced to the Central Caucasus region will cause a significant retreat of the snow line and a reduction in the accumulation area, which will cause the increasing degradation of the Elbrus glaciation in coming years.

**Keywords:** mountain glacier, Caucasus, Elbrus, the surface balance of mass, glacial runoff, mathematical model, numerical experiment, forecast.

### Введение

Фактическая сторона масштабов сокращения оледенения Эльбруса достаточно хорошо известна и отражена как в работах отечественных [1], [2], [3], так и зарубежных исследователей [4]. Эволюция оледенения Эльбруса в целом соответствует тенденции уменьшения площади оледенения на Кавказе в целом в последние два десятилетия 20-го века [5] и в начале 21-го века [6]. За период 1960-2014 площадь оледенения Эльбруса сократилась на  $14,7 \pm 2,4\%$ , темпы сокращения составили в среднем  $0,27\%$  в год [7], а за два десятилетия, 1997-2017 гг., – на  $10,8\%$  [8]. По состоянию на 2017 г. площадь оледенения Эльбруса составляла  $112,2 \pm 0,58 \text{ км}^2$  [8] (по другой оценке  $115,4 \text{ км}^2$ , а за вычетом скальных выступов и морен –  $108,8 \text{ км}^2$  в 2015 г. [9]), его объем оценивается в  $5,05 \pm 0,85 \text{ км}^3$  [8]. Реки, берущие начало на склонах Эльбруса, относятся к бассейнам Черного и Каспийского морей. Доля ледникового стока в

общем объеме стока рек северного склона Большого Кавказа оценивается в 1-9%, однако в теплый период года на отдельных реках его доля может достигать 40-45% [10]. Очевидно, что оледенение Эльбруса вносит значительный вклад в формирование режима стока, поскольку служит своего рода стабилизатором, поставляя воду в речную сеть в теплый период года, когда потребность в ней наиболее велика. Последнее обстоятельство обуславливает необходимость аккуратного расчета ледникового стока, который формируется на ледниковом комплексе Эльбруса, и, следовательно, расчет поверхностного баланса массы. Наиболее удобным инструментом для этого будет математическое моделирование, тем более, если стоит задача прогнозирования изменений стока с большой заблаговременностью.

Для настройки математической модели и ее валидации требуется определенный набор метеорологической и климатической информации в регионе исследования.

Начиная с 30-х годов XX века и до недавнего времени на склонах Эльбруса выполнялись фрагментарные метеонаблюдения различной продолжительности [11]. Инструментальные наблюдения за компонентами баланса массы систематически проводились, начиная с 1983 г., только на Гарабаши - одном из ледников Эльбруса на его южном склоне [12] (рис. 1). Для доинструментального периода ряд баланса массы был реконструирован с помощью дендрохронологических методов [13]. Таким образом, прямую калибровку и валидацию модели можно провести только на ограниченном участке ледникового комплекса, на котором проводились инструментальные наблюдения. В качестве альтернативы, для косвенной валидации модели возможно использовать космические снимки ледникового комплекса в разные моменты времени, однако это довольно трудоемкая задача, являющаяся, вообще говоря, самостоятельным научным исследованием.

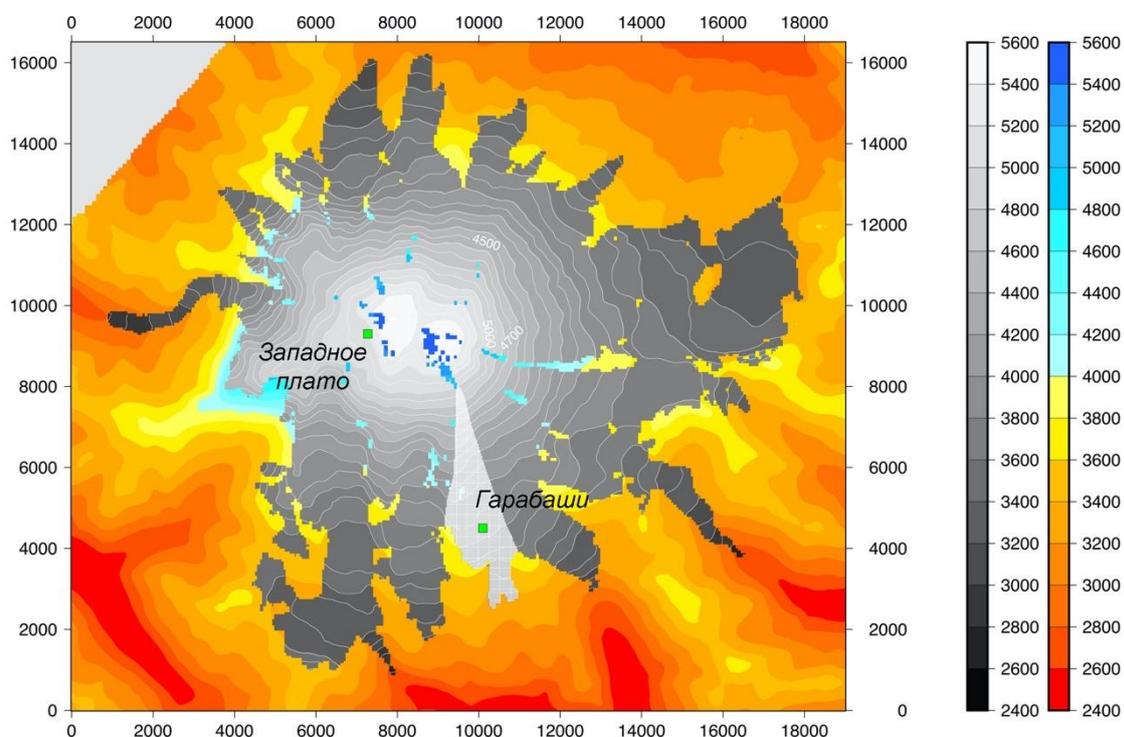


Рис. 1 – Цифровая модель рельефа ледникового комплекса Эльбруса (показан серым цветом) и окружающей области  
*Примечание: светло-серым выделен ледник Гарабаши. Зеленые квадратики указывают расположение автоматических метеостанций на леднике Гарабаши (3850 м над у.м.) и Западном плато (5150 м над у.м.). Здесь и на рис. 3 и 4 боковая оцифровка показывает расстояние в метрах от условной угловой точки области; изолинии высоты поверхности проведены через 200 м*

Математическая модель поверхностного баланса массы горного ледника подробно разобрана ранее, поэтому в настоящей статье мы не будем останавливаться на ее описании. Упомянем лишь, что модель в качестве составной части (суб-модели) комплексной динамической модели применялась для исследования горных ледников Марух (Западный Кавказ) [14], Джанкуат (Центральный Кавказ) [15], [16], Сары-Тор (Внутренний Тянь-Шань) [17], Туюкс (Заилийский Алатау, не опубликовано). В приведенных работах содержится подробное описание модели.

В настоящей статье рассматриваются вероятные изменения поверхностного баланса массы ледникового комплекса Эльбруса в результате реализации экстремального по версии Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) сценария RCP8.5 [18].

#### **Особенности постановки численных экспериментов**

##### **Климатический форсинг**

Как и в работах [15], [16] в качестве исходной климатической информации использованы ряды 1999-2008 гг. приземной температуры воздуха на метеостанции Терскол, расположенной в полутора десятках километров от южных отрогов Эльбруса, и сумм осадков на метеостанции Местиа, расположенной несколько дальше, на территории Грузии на южном склоне Главного Кавказского хребта. Выбор станции Местиа обусловлен тем, что ряды осадков на ней имеют гораздо меньше пропусков, чем на станции Терскол, а общее количество и распределение осадков в течение

года очень схожи с таковыми на Терсколе. Исходные ряды среднесуточной температуры воздуха и сумм осадков осреднялись за балансовое десятилетие, в результате были получены два ряда длиной из 365 среднесуточных (температура) и суточных сумм (осадки) значений.

Значения температуры воздуха в каждом узле регулярно сетки  $25 \times 25$  м на леднике были получены масштабированием значений на Западном плато Эльбруса (5150 м над у.м.) с использованием высотного градиента  $-0,6$  °C/км, что соответствует среднему температурному градиенту для этого региона [11]. В свою очередь, значения температуры воздуха на Западном плато были получены из ряда среднесуточных значений на станции Терскол с помощью простого линейного соотношения  $T_{\text{Западное плато}} = a + bT_{\text{Терскол}}$ , рассчитанному в ходе анализа параллельных наблюдений на двух метеостанциях – Терскол и автоматической метеостанции (АМС), которая функционировала в августе и сентябре 2007 г. на Западном плато Эльбруса на абсолютной высоте 5150 м над у.м. (рис. 1 и 2а). Характерно, что значение коэффициента  $b$  практически совпадает с аналогичным значением в линейном уравнении связи рядов температуры воздуха на станции Терскол и АМС на леднике Джанкуат, расположенном в 20 км от Терскола в противоположном (по отношению к Эльбрусу) направлении [16]. В то же время, значение коэффициента  $b$  в выражении  $T_{\text{Гарабаши}} = a + bT_{\text{Терскол}}$ , связывающем температуру воздуха на АМС на леднике Гарабаши (3850 м над у.м., функционировала в июле и августе 2013 г., см. рис. 1), и на метеостанции Терскол, несколько больше предыдущего (рис. 2б).

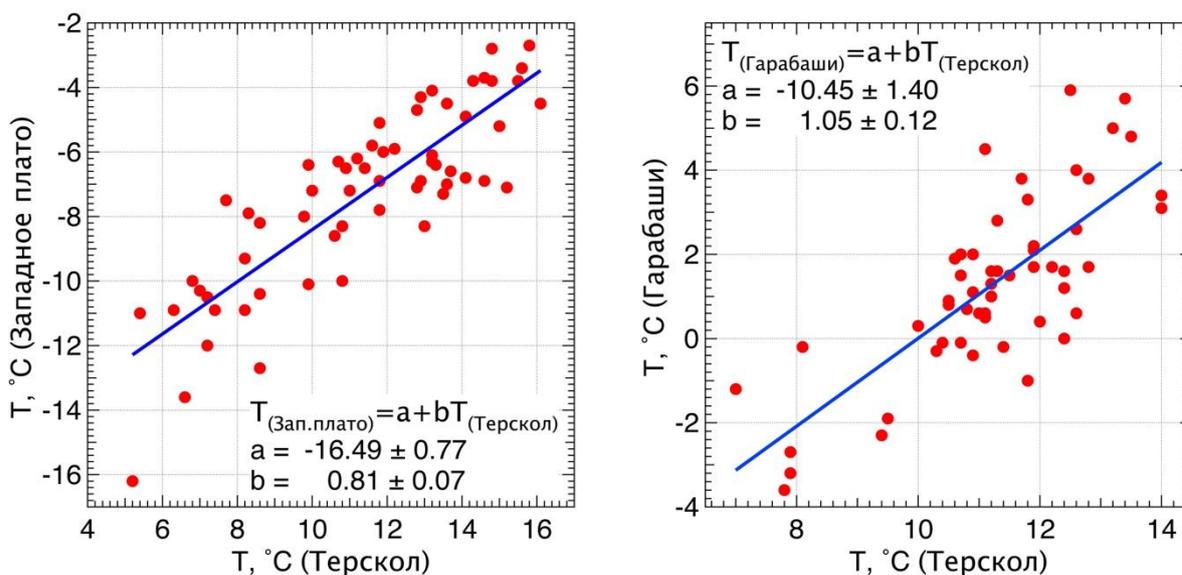


Рис. 2 – Линейные соотношения между среднесуточной приземной температурой воздуха на сетевой метеостанции Терскол и АМС на Западном плато Эльбруса (а) и АМС на леднике Гарабаши (б)

Высотный градиент осадков в диапазоне высот 3300-4000 м составил  $1,3 \times 10^{-4}$  м/м в холодное полугодие (октябрь-март) и  $0,5 \times 10^{-4}$  м/м в теплое полугодие (апрель-сентябрь). Такой выбор значений высотного градиента обеспечил максимальное значение осадков и аккумуляции в поясе 3900-4000 м (1327 и 1275 мм водн. экв. соответственно), что в целом соответствует наблюдениям на леднике Гарабаши [9.] [12]. Опять же согласно наблюдениям [12] выше 4000 м аккумуляция (но не количество осадков) быстро снижается из-за перемещения снега вниз по склону лавинами и выдувания ветром. Учитывая значительную межгодовую изменчивость аккумуляции, в модели были заданы такие высотные градиенты осадков выше 4000 м, какие бы обеспечили среднегодовую аккумуляцию выше 5500 м на уровне 445 мм водн. экв., что качественно соответствует обрывочным данным наблюдений. Набор остальных параметров модели обеспечил итоговый модельный баланс массы всего комплекса в контрольном эксперименте очень близкий к нулевому (-3,1 мм водн. экв.). Фактически, этот баланс массы соответствует климатическим условиям десятилетия 1999-2008 гг.

## 2.2 Формализация климатических изменений

Климатические изменения в регионе исследования получены в результате расчетов на климатической модели INMCM Института вычислительной математики РАН и последующей регионализации полученных данных к исследуемой области. Методика регионализации и полученные результаты для Черноморско-Каспийского региона целом и для отдельных регионов на Кавказе детально разобраны в работе [19]. Прогноз внутригодового роста температуры и суммарной радиации в среднем за период 2071-2100 относительно средних 1971-2000 согласно [19] приведен в табл. 1. Данные расчетов были использованы нами для оценки вероятных изменений поверхностного баланса массы (SMB) и ледникового стока (RO), а также отношения площади аккумуляции к общей площади ледникового комплекса (AAR) вследствие роста приземной температуры воздуха и суммарной радиации (эксп. 2 и 3 в табл. 2) Изменение осадков к концу текущего столетия в Черноморско-Каспийском регионе согласно [19] в целом статистически незначимо. Однако в отдельных областях в пределах региона прогнозируется их снижение, причем как в зимние, так и в летние месяцы (например, в области ледников Марух и Джанкуат). Поэтому нами проведены также и эксперименты, в которых задано сокращение осадков на 10% в холодное и теплое полугодие и в течение всего года (эксп. 4-6 в табл. 2). В эксп. 7 задействованы изменения всех трех факторов.

Таблица 1 – Модельные оценки изменения приземной температуры воздуха для Центрального Кавказа ( $\Delta T$ , °C) и суммарной радиации ( $\Delta S$ , Вт м<sup>-1</sup>) в 2071-2100 гг. по сравнению с периодом 1971-2000 гг. [19]

Мес.	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$\Delta T$	3,1	2,9	2,8	2,8	3,5	4,6	5,2	4,6	3,8	3,0	3,5	3,5
$\Delta S$	-0,3	0	0	1,2	18,3	21,0	15,8	2,2	10,7	9,9	2,0	-0,5

Таблица 2 – Характеристика численных экспериментов и их результаты.

Эксп.	1	2	3	4	5	6	7
$\Delta T$	-	+	+	-	-	-	+
$\Delta S$	-	-	+	-	-	-	+
$\Delta P_W$	-	-	-	+	-	-	-
$\Delta P_S$	-	-	-	-	+	-	-
$\Delta P_{WS}$	-	-	-	-	-	+	+
AAR	0,73	0,22	0,19	0,70	0,72	0,68	0,14
SMB	-3	-854	-960	-96	-56	-148	-1103
RO	1072	1757	1868	1095	1051	1073	1863

Обозначения: знак «+» означает, что данный вид форсинга присутствует, знак «-» – отсутствует,  $\Delta T$  – приземная температура,  $\Delta S$  – суммарная солнечная радиация,  $\Delta P_W$  – зимние осадки,  $\Delta P_S$  – летние осадки,  $\Delta P_{WS}$  – годовые осадки, AAR – соотношение между площадью аккумуляции и общей площадью ледника (accumulation area ratio), SMB – поверхностный баланс массы (мм водн. экв.), RO – сток (мм водн. экв.).  
Эксперимент 1 – контрольный

### Обсуждение результатов

В контрольном эксперименте (эксп. 1) абляция фактически прекращается выше отметки 5100 м над у.м. (рис. 3а), ниже 4300 м сезон абляции продолжается более трех месяцев. Заметим, что в контексте настоящего исследования за день с абляцией принимается день, в который таяние наблюдалось хотя бы в течение одного часа. Годовой баланс массы, как было упомянуто выше, близок к нулю, AAR=0,73 (то есть в зоне абляции, где расход массы больше, чем ее приход, находится немногим более четверти площади оледенения). Высота снеговой линии (границы между зонами аккумуляции и абляции) находится на высоте около 3600 м над у.м., иногда опускаясь на высоту до 3500 м над у.м. (рис. 4а). В зоне с абляцией более 1000 мм водн. экв. находятся только концевые части ледников.

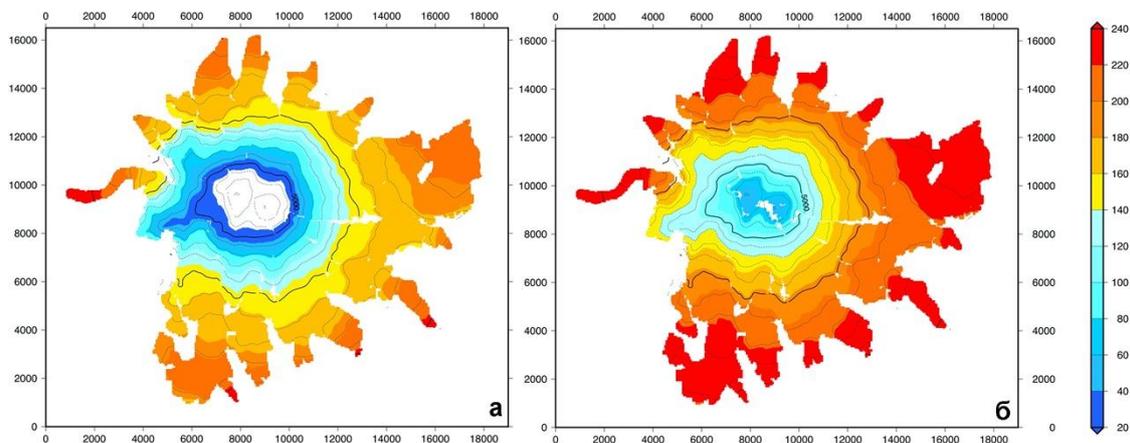


Рис. 3 – Количество дней с абляцией в контрольном эксперименте (Эксп. 1 в табл. 2) (а) и в Эксп. 7 (б)

Подключение температурного форсинга в эксп. 2 (табл. 1) приводит к резкому снижению баланса массы до -854 мм водн. экв. и подъему снеговой линии до высоты 4400-4600 м над у.м. (рис. 4б). Соответственно более, чем в три раза сокращается площадь зоны аккумуляции.

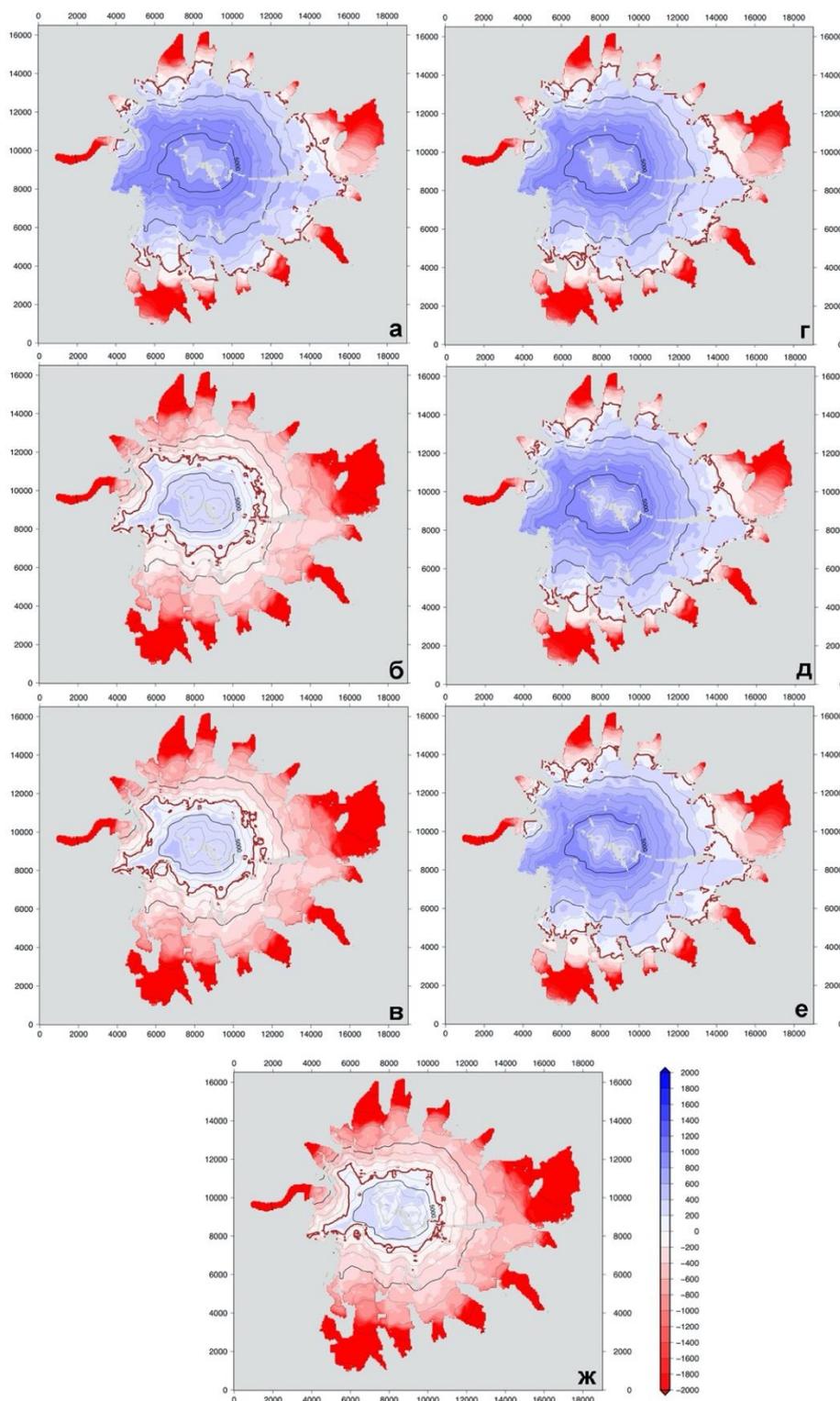


Рис. 4 – Поверхностный баланс массы (мм водн. экв.) в контрольном эксперименте (Эксп. 1) (а), эксп. 2 (б), эксп. 3 (в), эксп. 4 (г), эксп. 5 (д), эксп. 6 (е), эксп. 7 (ж) – см. табл. 2. Коричневым цветом показана снеговая линия

При подключении радиационного форсинга (эксп. 3) происходит дальнейшее снижение баланса массы (до -960 мм водн. экв.). Снеговая линия поднимается еще на 200 м.

Использование в качестве форсинга снижение сумм осадков на ожидаемую характерную величину 10% – зимних (эксп. 4), летних (эксп. 5) и годовых (эксп. 6) влечет за собой не столь разрушительные для ледника последствия, как ожидаемый рост приземной температуры воздуха. AAR остается без существенных изменений, баланс массы, разумеется, несколько понижается за счет сокращения его приходной части баланса массы. Характерно, что в эксп. 5 снижение летних осадков вызывает снижение ледникового стока, который состоит не только из талой ледниковой воды, но и из суммы выпавших жидких осадков, которые не подверглись вторичному замерзанию при просачивании в толщу снега/фирна.

При воздействии всех трех факторов (эксп. 7) изменения наиболее внушительны. Снеговая линия поднимается до высоты 4800-4900 м над у.м., а AAR сокращается в пять раз по сравнению с контрольным экспериментом, так что

зона аккумуляции составляет лишь 14% общей площади комплекса. Величина ледникового стока увеличивается на 80% по сравнению с контрольным экспериментом.

Здесь, однако, необходимо сделать очень важное примечание. В настоящей работе все оценки сделаны для конфигурации ледника по состоянию на 2014 г. Нами не рассматривалось течение льда, которое приводит к перераспределению массы льда вниз по склону. Соответственно, все оценки сделаны, исходя из современной площади оледенения. Разумеется, по мере отступления ледников Эльбруса ААР, баланс массы и сток необходимо будет рассчитывать, исходя из меньшей площади. Тем не менее, прогностическое положение снеговой линии, а также ожидаемое количество дней с абляцией (за исключением показателя для участков, которые должны исчезнуть) изменится несущественно.

#### Благодарности

Авторы благодарят П.А. Торопова (географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова) за предоставленные метеорологические данные, И.И. Лаврентьева и С.С. Кутузова (Институт географии РАН) за данные по рельефу исследуемого региона.

#### Конфликт интересов

Не указан

#### Acknowledgements

Authors appreciate P.A. Toropov (Department of Geography, M.V. Lomonosov Moscow State University) for meteorological data, I.I. Lavrentiev and S.S. Kutuzov (Institute of Geography of RAS) for data on the relief in the region of interest.

#### Conflict of interest

Not declared

#### Список литературы / References

1. Золотарев Е.А. Сокращение оледенения Эльбруса в XX столетии / Е.А. Золотарев, А.А. Алейников, Е.Г. Харьковец // *Материалы гляциологических исследований*. - 2005. - Вып. 98. - С. 162-166.
2. Золотарев Е.А. Оценка деградации оледенения Эльбруса методами цифрового картографирования / Е.А. Золотарев, Е.Г. Харьковец // *Вестник МГУ, Серия географическая*. - 2007. - №5. - С. 45-51.
3. Золотарев Е.А. Картографо-аэрокосмический мониторинг баланса массы оледенения Эльбруса после МГТ / Е.А. Золотарев, Е.Г. Харьковец // *Материалы гляциологических исследований*. - 2007. - Вып. 103. - С. 123-128.
4. Holobâcă I.-H. Recent retreat of the Elbrus glacier system / I.-H. Holobâcă // *Journal of Glaciology*. - 2016. - V. 62(231). - P. 94-102. doi: 10.1017/jog.2016.15
5. Stokes C.R. Late-20th-century changes in glacier extent in the Caucasus Mountains, Russia/Georgia / C.R. Stokes, S.D. Gurney, M. Shahgedanova, V. Popovnin // *Journal of Glaciology*. - 2006. - V. 52(176). - P. 99-109.
6. Shahgedanova M. Deglaciation of the Caucasus Mountains, Russia/Georgia, in the 21st century observed with ASTER satellite imagery and aerial photography / M. Shahgedanova, G. Nosenko, S. Kutuzov et. al. // *The Cryosphere*. - 2014. - V. 8. - P. 2367-2379. doi:10.5194/tc-8-2367-2014
7. Tielidze L.G. The Greater Caucasus Glacier Inventory (Russia, Georgia and Azerbaijan) / L.G. Tielidze, R.D. Wheate // *The Cryosphere*. - 2018. - V. 12. - P. 81-94. https://doi.org/10.5194/tc-12-81-2018
8. Kutusov S. Volume Changes of Elbrus Glaciers From 1997 to 2017 / S. Kutusov, I. Lavrentiev, A. Smirnov et. al. // *Frontiers in Earth Sciences* [Электронный ресурс]. URL: https://doi.org/10.5194/tc-12-81-2018. 2018. V. 7. Article 153.
9. Калов Х.М. Комплексный мониторинг динамики ледников Эльбруса / Х.М. Калов, М.Ю. Беккиев, М.Д. Докукин // *Материалы Всероссийской конференции «Устойчивое развитие: проблемы, концепции, модели»*. - Нальчик: 2017. - С. 156-159.
10. Лурье П.М. Влияние изменения климата на современное оледенение и сток рек северного склона Большого Кавказа / П.М. Лурье, В.Д. Панов // *Устойчивое развитие горных территорий*. - 2013. - Т. 5. - №2. - С. 70-77.
11. Торопов П.А. Температурный и радиационный режим ледников на склонах Эльбруса в период абляции за последние 65 лет / П.А. Торопов В.Н. Михаленко, С.С. Кутузов и др. // *Лед и Снег*. - 2016. - Т. 56. - №1. - С. 5-19. doi:10.15356/2076-6734-2016-1-5-19
12. Рототаева О.В. Изменения баланса массы ледника Гарабаши (Эльбрус) на рубеже XX–XXI вв. / О.В. Рототаева, Г.А. Носенко, А.М. Керимов и др. // *Лед и Снег*. - 2019. - Т. 59. - №1. - С. 5-22. doi: 10.15356/2076-6734-2019-1-5-22
13. Долгова Е.А. Реконструкция баланса массы ледника Гарабаши (1800–2005 гг.) по дендрохронологическим данным / Е.А. Долгова В.В. Мацковский, О.Н. Соломина и др. // *Лед и Снег*. - 2013. - Т. 53. - №1. - С. 34-42.
14. Рыбак О.О. Калибровка математической модели динамики ледника Марух, Западный Кавказ / О.О. Рыбак, Е.А. Рыбак, С.С. Кутузов и др. // *Лед и Снег*. - 2015. - Т. 55. - №2. - С. 9-20.
15. Rybak O.O. Model-based calculations of surface mass balance of mountain glaciers for the purpose of water consumption planning: focus on Djankuat Glacier (Central Caucasus) / O.O. Rybak., E.A. Rybak. // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. - 2018. - V. 107. - doi :10.1088/1755- 1315/107/1/012041.
16. Рыбак О.О. Применение данных сетевых метеорологических станций для расчета баланса массы ледников (на примере ледника Джанкуат, Центральный Кавказ) / О.О. Рыбак, Е.А. Рыбак // *Системы контроля окружающей среды*. - 2017. - Вып. 9 (29). - С. 100-108.
17. Рыбак О.О. Модельные исследования эволюции горных ледников на примере ледника Сары-Топ (Внутренний Тянь-Шань) / О.О. Рыбак, Е.А. Рыбак., Н.А. Яицкая и др. // *Криосфера Земли*. - 2019. - Т. 23. - №3. - С. 33-51. doi:10.21782/KZ1560-7496-2019-3(33-51)
18. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (AR5) / Eds.: T.F. Stocker, D. Qin, G. K. Plattner et al. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press. - 2013. 1535 p.

19. Морозова П.А. Регионализация данных глобального климатического моделирования для расчета баланса массы горных ледников / П.А. Морозова, О.О. Рыбак // Лед и Снег. 2017. Т. 57. №4. С. 437-452. doi: 10.15356/2076-6734-2017-4-437-452

#### Список литературы на английском языке / References in English

1. Zolotarev E.A. Sokrashchenie oledeneniya El'brusa v XX stoletii [Shrinking of Elbrus glaciation in the XX century] / E.A. Zolotarev, A.A. Alejnikov, E.G. Har'kovec // Materialy glyaciologicheskikh issledovanij [Data of Glaciological Studies]. – 2005. – No. 98. – P. 162-166 [in Russian]
2. Zolotarev E.A. Ocenka degradacii oledeneniya El'brusa metodami cifrovogo kartografirovaniya [Estimate of degradation of Elbrus glaciation using methods of numerical mapping] / E.A. Zolotarev, E.G. Har'kovec // Vestnik MGU, Seriya geograficheskaya [Herald of the Moscow State University, Geographical Series]. – 2007. – №5. – P. 45-51. [in Russian]
3. Zolotarev E.A. Kartografo-aerokosmicheskij monitoring balansa massy oledeneniya El'brusa posle MGG [Mapping and aerial-and-space monitoring of Elbrus glaciation mass balance after IGY] / E.A. Zolotarev, E.G. Har'kovec // Materialy glyaciologicheskikh issledovanij [Data of Glaciological Studies]. – 2007. – No. 103. – P. 123-128. [in Russian]
4. Holobăcă I.-H. Recent retreat of the Elbrus glacier system / I.-H. Holobăcă // Journal of Glaciology. – 2016. – V. 62(231). – P. 94-102. doi: 10.1017/jog.2016.15
5. Stokes C.R. Late-20th-century changes in glacier extent in the Caucasus Mountains, Russia/Georgia / C.R. Stokes, S.D. Gurney, M. Shahgedanova, V. Popovnin // Journal of Glaciology. – 2006. – V. 52(176). – P. 99-109.
6. Shahgedanova M. Deglaciation of the Caucasus Mountains, Russia/Georgia, in the 21st century observed with ASTER satellite imagery and aerial photography / M. Shahgedanova, G. Nosenko, S. Kutuzov et. al. // The Cryosphere. – 2014. – V. 8. – P. 2367-2379. doi:10.5194/tc-8-2367-2014
7. Tielidze L.G. The Greater Caucasus Glacier Inventory (Russia, Georgia and Azerbaijan) / L.G. Tielidze, R.D. Wheate // The Cryosphere. – 2018. – V. 12. –P. 81-94. https://doi.org/10.5194/tc-12-81-2018
8. Kutusov S. Volume Changes of Elbrus Glaciers From 1997 to 2017 / S. Kutusov, I. Lavrentiev, A. Smirnov et. al. // Frontiers in Earth Sciences [Электронный ресурс]. URL: https://doi.org/10.5194/tc-12-81-2018. 2018. V. 7. Article 153.
9. Kalov H.M. Kompleksnyj monitoring dinamiki lednikov El'brusa [Complex monitoring of Elbrus glaciers dynamics] / H.M. Kalov, M.Yu. Bekkiev, M.D. Dokukin // Materialy Vserossijskoj konferencii «Ustojchivoe razvitie: problemy, koncepcii, modeli» [Materials of the All-Russian Conference “Sustainable development: problems, concepts, models”]. – Nal'chik: 2017. – P. 156-159. [in Russian]
10. Lur'e P.M. Vliyanie izmeneniya klimata na sovremennoe oledenenie i stok rek severnogo sklona Bol'shogo Kavkaza [Impact of climate change on the modern glaciation and river runoff on the northern slope of the Greater Caucasus] / P.M. Lur'e, V.D. Panov // Ustojchivoe razvitie gornyh territorij [Sustainable development of mountain territories]. – 2013. – V. 5. – №2. – P. 70-77. [in Russian]
11. Toropov P.A. Temperaturnyj i radiacionnyj rezhim lednikov na sklonah El'brusa v period ablyacii za poslednie 65 let [Temperature and radiation regime of glaciers on slopes of the Mount Elbrus in the ablation period over last 65 years] / P.A. Toropov V.N. Mihalenko, S.S. Kutuzov et al. // Led i Sneg [Ice and Snow]. – 2016. – V. 56. – №1. – P. 5-19. doi:10.15356/2076-6734-2016-1-5-19 [in Russian]
12. Rototaeva O.V. Izmeneniya balansa massy lednika Garabashi (El'brus) na rubezhe XX–XXI vv. [Changes of the mass balance of the Garabashy Glacier, Mount Elbrus, at the turn of 20th and 21st centuries] / O.V. Rototaeva, G.A. Nosenko, A.M. Kerimov et al. // Led i Sneg [Ice and Snow]. – 2019. – V. 59. – №1. – P. 5-22. doi: 10.15356/2076-6734-2019-1-5-22 [in Russian]
13. Dolgova E.A. Rekonstrukciya balansa massy lednika Garabashi (1800–2005 gg.) po dendrohronologicheskim dannym [Reconstruction of mass balance of Garabashi Glacier (1800-2005) using dendrochronology data] / E.A. Dolgova V.V. Mackovskij, O.N. Solomina et al. // Led i Sneg [Ice and Snow]. – 2013. – V. 53. – No. 1. – P. 34-42. [in Russian]
14. Rybak O.O. Kalibrovka matematicheskoy modeli dinamiki lednika Maruh, Zapadnyj Kavkaz [Calibration of a mathematical model of Marukh Glacier, Western Caucasus ] / O.O. Rybak, E.A. Rybak, S.S. Kutuzov et al. // Led i sneg [Ice and Snow]. – 2015. – V. 55. – №2. – P. 9-20. [in Russian]
15. Rybak O.O. Model-based calculations of surface mass balance of mountain glaciers for the purpose of water consumption planning: focus on Djankuat Glacier (Central Caucasus) / O.O. Rybak., E.A. Rybak. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2018. – V. 107. – doi :10.1088/1755- 1315/107/1/012041.
16. Rybak O.O. Primenenie dannyh setevyh meteorologicheskikh stancij dlya rascheta balansa massy lednikov (na primere lednika Dzhankuat, Central'nyj Kavkaz) [Application of observations on the regular meteorological stations for calculation of mass balance of mountain glaciers (case study of Djankuat Glacier, Central Caucasus)] / O.O. Rybak, E.A. Rybak // Sistemy kontrolya okruzhayushchej sredy [Systems of Environmental Control]. – 2017. – No. 9 (29). – P. 100-108. [in Russian]
17. Rybak O.O. Model'nye issledovaniya evolyucii gornyh lednikov na primere lednika Sary-Tor (Vnutrennij Tyan'-SHan') [Modeling the evolution of mountain glaciers: a case study of Sary-Tor glacier, Inner Tien Shan] / O.O. Rybak, E.A. Rybak., N.A. YAickaya et al. // Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere]. – 2019. – V. 23. – No 3. – P. 33-51. doi:10.21782/KZ1560-7496-2019-3(33-51) [in Russian]
18. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (AR5) / Eds .: T.F. Stocker, D. Qin, G. K. Plattner et al . Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press. – 2013. 1535 p.
19. Morozova P.A. Regionalizaciya dannyh global'nogo klimaticheskogo modelirovaniya dlya rascheta balansa massy gornyh lednikov [Downscaling of the global climate model data for the mass balance calculation of mountain glaciers] / P.A. Morozova, O.O. Rybak // Led i Sneg [Ice and Snow]. 2017. V. 57. No. 4. P. 437-452. doi: 10.15356/2076-6734-2017-4-437-452 [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.90.12.028>

**ТЕХНОГЕННО-МИНЕРАЛЬНЫЕ ОБРАЗОВАНИЯ И ВОДЫ НЕКОТОРЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ  
СЕВЕРНОЙ ИТАЛИИ**

Научная статья

**Наумов В.А.<sup>1</sup>, Фиоруччи А.<sup>2</sup>, Брюхов В.Н.<sup>3</sup>, Голдырев В.В.<sup>4</sup>, Мовзитова К.И.<sup>5,\*</sup>, Фетисов В.В.<sup>6</sup>**  
<sup>1, 3, 4, 5, 6</sup> Естественнаучный институт Пермского государственного национального исследовательского университета,  
Пермь, Россия;

<sup>2</sup> Туринский Политехнический университет, Турин, Италия

\* Корреспондирующий автор (ksyumovzitova[at]mail.ru)

**Аннотация**

Показаны основные черты геологического строения и вещественных комплексов Северной Италии, изученные в рамках проекта по проведению исследований благороднометальной минерализации техногенно-минеральных образований Международной исследовательской группы Пермского края. Рассмотрены процессы техногенеза и техногеогенеза, характерные для техногенно-минеральных образований и технологических вод. Получены экспериментальные данные по осаждению и укрупнению частиц нанозолота из растворов на угли, которые служат основой для разработки технологий освоения гидроминерального сырья, образующегося из технологических вод в пределах золотоносных техногенно-минеральных образований.

**Ключевые слова:** микро- и нанозолото, сорбция золота на углях, техногенно-минеральные образования.

**TECHNOGENIC MINERAL FORMATIONS AND WATERS OF SOME DEPOSITS IN NORTHERN ITALY**

Research article

**Naumov V.A.<sup>1</sup>, Fiorucci A.<sup>2</sup>, Bryukhov V.N.<sup>3</sup>, Goldyrev V.V.<sup>4</sup>, Movzitova K.I.<sup>5,\*</sup>, Fetisov V.V.<sup>6</sup>**  
<sup>1, 3, 4, 5, 6</sup> Institute of Natural Sciences, Perm State National Research University, Perm, Russia;

<sup>2</sup> Polytechnic University of Turin, Turin, Italy

\* Corresponding author (ksyumovzitova[at]mail.ru)

**Abstract**

The basic features of the geological structure and material complexes of Northern Italy are shown in the paper. They were studied under the project in conducting research on the noble metal mineralization of technogenic and mineral formations of the International Perm Group of the Perm Region. The authors considered the processes of technogenesis and technogeogenesis, which are typical for technogenic and mineral formations and process waters. Experimental data were obtained on the deposition and enlargement of nanogold particles from solutions on coals, which are the basis for the development of technologies for the development of hydromineral raw materials generated from industrial waters within gold-bearing technogenic and mineral formations.

**Keywords:** micro- and nanogold, sorption of gold on coals, technogenic-mineral formations.

Геологическое строение северной Италии обусловлено условиями формирования вещественных комплексов Альпийской покровно-складчатой системы Средиземноморского орогенно-складчатого пояса. В Альпах - это пакет тектонических покровов чехла, представленных отложениями, в основном карбонатными и глинистыми, пассивной окраины Евразии, от пермских до эоценовых. Центральная мегазона Альп соответствует океанскому бассейну Западного Тетиса. Океанская кора мегазоны представлена офиолитами. Они перекрыты толщей черных сланцев, которые в результате метаморфизма преобразованы в «блестящие сланцы». На них залегают мел-нижнепалеогеновый флиш. Все четыре элемента строения мегазоны - континентальный субстрат, офиолиты, «блестящие сланцы» и флиш образуют самостоятельные тектонические покровы [1] с ограниченным развитием интрузивных образований [2].

Для ранней стадии альпийского этапа тектогенеза характерны медно-колчеданные месторождения, для поздней, орогенной, стадии — скарновые и гидротермальные месторождения руд вольфрама и молибдена, золота, свинца и цинка, медно-порфировые месторождения. Среди осадочных формаций альпид находятся крупные месторождения Средиземноморской бокситоносной провинции, встречаются осадочные месторождения железа и марганца. Среди терригенно-карбонатных комплексов северной Италии выявлены месторождения строительных материалов, мрамора, гранита, травертина. С эндогенными породами связаны месторождения самородной серы, ртути, пирита; имеются золотоносные и полиметаллические объекты, небольшие месторождения железной руды и др. [3]. Добыча железа ведется уже 2700 лет и сейчас сохранилась лишь в Аосте, Траверселле и на острове Эльба [4].

Разработка месторождений ведет к образованию техногенных отвалов, или техногенно-минеральных образований (ТМО; technogenic-mineral formations - TMF), изменению состава поверхностных и подземных вод, экологической ситуации в регионах, где располагаются месторождения. Идеология и алгоритмы изучения ТМО складываются из понимания, знания и учета процессов техногенеза и техногеогенеза. Техногенез рассматривается как «техническая деятельность человека, вооруженного техникой» или «геологический процесс, связанный с технической деятельностью человека, вооруженного техникой» [5]. Техногеогенез – геологический процесс, протекающий в техногенных осадках, образовавшихся в результате отработки месторождений [6] и представляющий собой процесс взаимодействия лито-, гидро-, атмо- и биосферы в продуктах технической деятельности человека или ТМО [7].

На формирование ТМО влияют следующие факторы: 1) геология месторождения (генетического типа, первичных форм нахождения полезных компонентов, минералого-петрографической характеристики первичного вещества и его химического состава); 2) технология разработки и технологическая схема отработки месторождения; 3) система формирования техногенных отвалов; 4) процессы последующего преобразования вещественного состава ТМО и изменение химического состава технологических вод. В процессе взаимодействия пород с водой она растворяет полезные компоненты, изменяет свой состав и может быть оценена как гидроминеральное сырье для последующего извлечения полезных компонентов.

Проект международной исследовательской группы Пермского края «Разработка природоподобной технологии формирования концентраций полезных компонентов внутри техногенных отвалов» направлен на изучение данных проблем с целью вторичного использования техногенных отвалов, технологических вод и минимизации неблагоприятных последствий для окружающей среды. Исследования в рамках проекта проводятся второй год. В рамках проекта было организовано два курса лекций в Пермском университете, выездные семинары в Туринском политехническом университете.

Практическая реализация проекта выполнена на техногенных объектах Северной Италии и России. В Северной Италии оценены техногенные объекты Южных Альп (регионы Пьемонт и Аоста). Объект исследования 2018 года – скарновое железорудное месторождение «Плутон Траверселла», отработанное в интересах автомобильной фирмы «Фиат». Оно расположено в п. Траверселла в провинции г. Турина, находящийся к западу от моренного амфитеатра Ивреа, на въезде в Валь-Киуселла.

«Плутон Траверселла» (см. рисунок 1) – позднеорогенное магматическое образование, состоящее из кварцевого диорита. Плутон контактирует с метаморфическим комплексом, состоящим из гнейсов и слюдяных сланцев. Контактный ореол представлен биотитовыми и андалузитовыми гнейсами. Основным рудным минералом был магнетит, встречались шеелит, уранинит-торифера, пирит и халькопирит, в меньшем количестве – кобальтит и молибденит [8]. После отработки части месторождения осталась железорудная штольня, ТМО не сохранились.

Нами проведено опробование коренных пород в пределах штольни, отобраны образцы разных рудных минералов, взяты пробы воды, дренирующей рудную и околорудную зоны, а также «пустые» вмещающие породы. При визуальном изучении материала установлено большое количество окисленного, под воздействием процессов техногенеза, пирита и других сульфидов. По данным анализов сульфиды являются слабозолотоносными. В этой связи по аналогии с изученными Уральскими объектами можно ожидать, что происходит высвобождение тонкого и связанного золота из сульфидов и дальнейшая его миграция вместе с рудничными водами.

Осенью 2019 года были изучены ТМО разработки месторождения рудника Chamouira кварц-золоторудной формации (см. рисунок 1). Объект находится вблизи муниципалитета Бруссон, расположенного в центре региона Валлед'Аоста. Разрабатывали золото-кварцевые жилы, которые пересекли гнейсовые и слюдяные сланцы, развитые в этом районе. Жила Fenilliaz, одна из крупнейших, эксплуатировавшаяся на семи уровнях, имела среднюю мощность от 60 до 80 см. Другие жилы, такие как жила Сперанцы имела среднюю мощность 30 см, жила Газ-Бьянче имела большую мощность, но более сложное строение [8].

В северных регионах Италии горнорудная промышленность и, следовательно, ТМО развиты слабо. Это связано со слабой рудоносностью пород, а также с тем, что потенциально перспективные на редкие и благородные металлы отвалы используют как сырье для строительных нужд. Подобные объекты расположены в южной Италии (Сардиния, Сицилия), где сейчас ведется разработка полиметаллических и золоторудных месторождений. Объекты распространения ТМО являются первоочередными объектами изучения.

ТМО, содержащие благородные металлы в твердой фазе, детально изучены геологами Пермского государственного национального исследовательского университета на золото- и платиносодержащих отвалах месторождений России (Урала и Сибири) [9], Канады и других территорий. Техногенное преобразование вещества в ТМО приводит к разрушению минеральных фаз, высвобождению золота и других элементов, миграции и концентрации благородных металлов внутри ТМО.

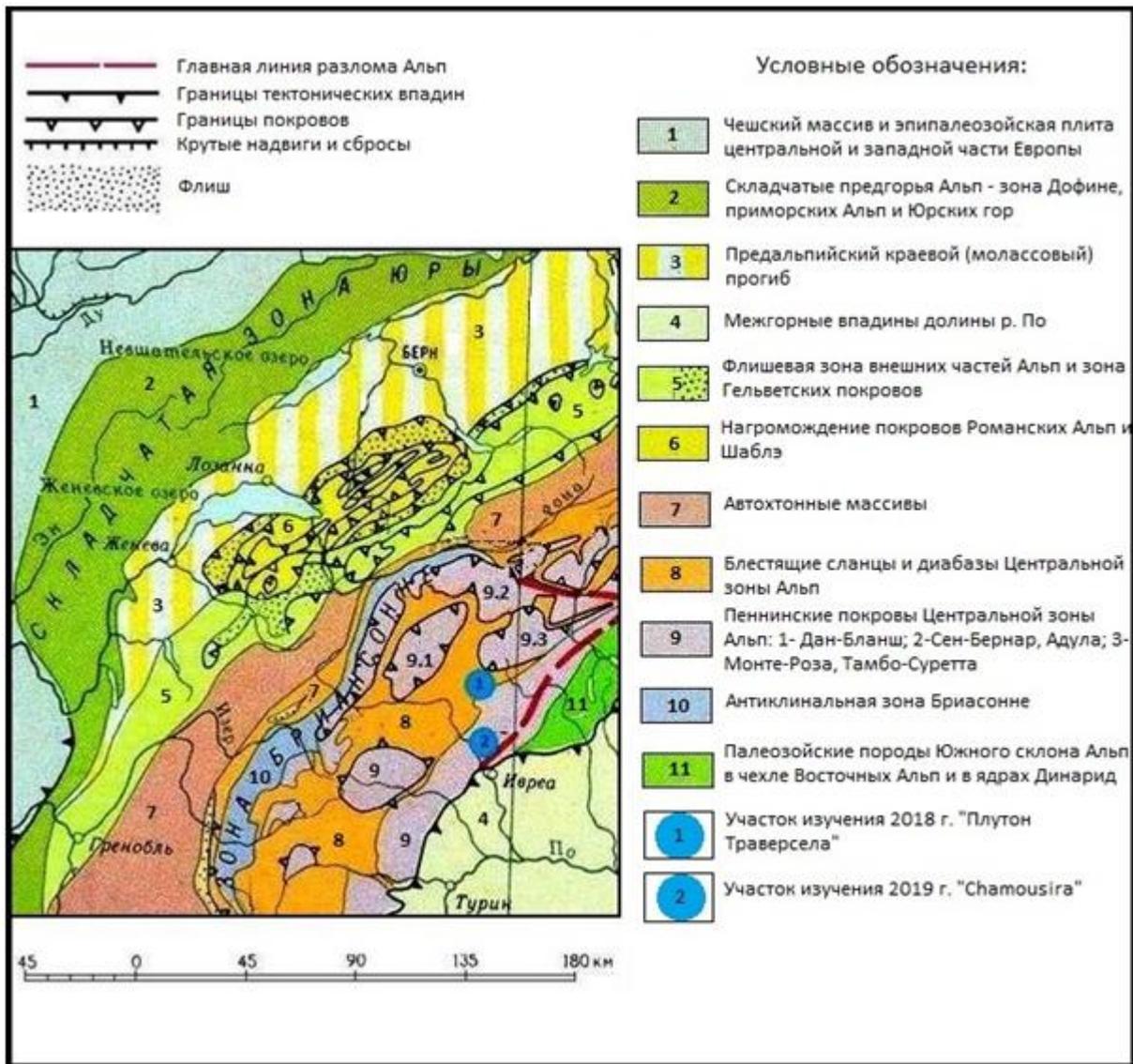


Рис. 1 – Вырезка из тектонической схемы Альп [10] с указанием мест изучения ТМО Северной Италии

Другим перспективным направлением использования ТМО является извлечение металлов из жидкой фазы, которая при определенных условиях представляет собой гидроминеральное сырье, и в то же время является источником, влияющим на изменение состава окружающей среды. Большое внимание в последние годы уделяется вопросам химического [11], [12], [13], биологического [15], [16], [17] высвобождения и осаждения золота из природных и техногенных вод в виде наночастиц золота [18], [19].

При взаимодействии сорбентов и технологической воды возможно физическое поглощение или обмен ионов редкоземельных элементов [20], благородных металлов и золота (см. рисунок 2). Физическое поглощение на углях обеспечивает восстановление ионов золота на их поверхности в виде металлических частичек размером от 100 нм до микронных пленок. При введении специализированных сорбентов происходит направленный ионный обмен и насыщение сорбента ионами золота [21].

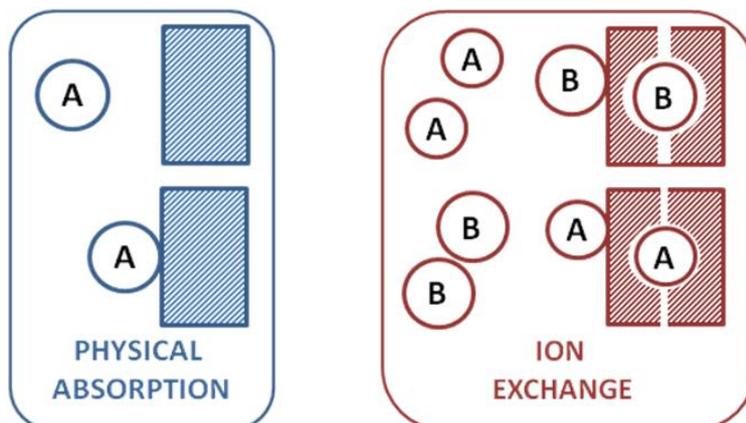


Рис. 2 – Принципиальная схема физической сорбции (А) и ионного обмена (Б) золота из технологических растворов

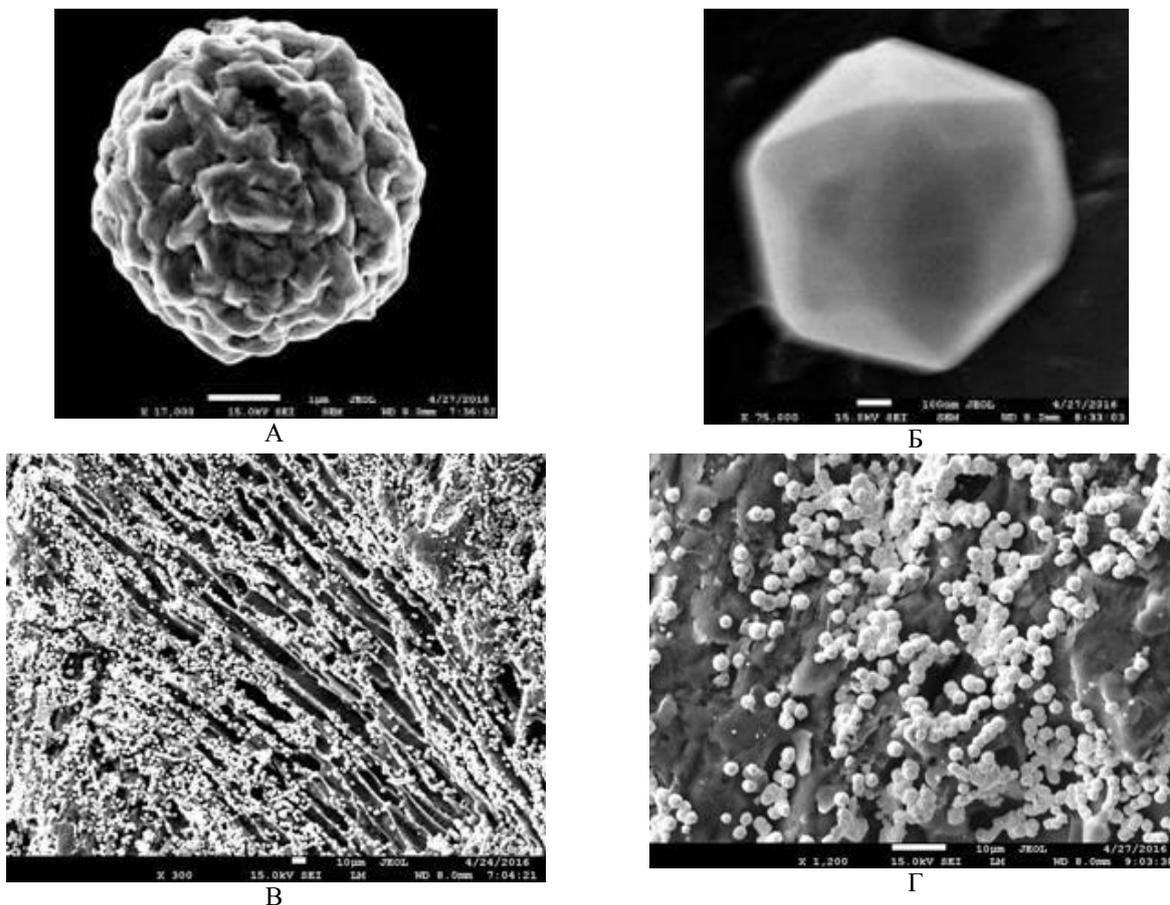


Рис. 3 – Экспериментальные данные восстановления золотоносных фаз в виде шарообразных агрегатов единичных кристаллитов (А), кристаллов (Б), цепочечных агрегатов шарообразных кристаллитов на разных участках поверхности (В, Г) частицы угля

Нами проведены лабораторные эксперименты по осаждению золота из обогащенных золотом технологических вод и определению форм нахождения частиц золота на углях [22], [23], [24]. Они показали, что процесс восстановления золота на сорбентах технически исполним, и может быть экономически выгоден. Установлено, что сорбированные частицы золота имеют вид округлых агрегатов первичных кристаллитов размером в несколько микрометров (иногда десятки микрометров). Кристаллиты представлены восстановленными до металла наночастицами золота с минимальным размером 30-70 нм. Они образуют округлые агрегаты (сростки) золота со средним размером 300-600 нм. Соседние агрегаты составляют цепочки, островки и пленки золота микронового размера. Некоторые пленки золота имеют толщину до нескольких десятков микрон и формируют «каркасные» и «массивные» покрытия поверхности частиц угля (см. рисунок 3). Таким образом, экспериментальные исследования доказывают принципиальную техническую возможность практического использования технологических вод в составе ТМО для извлечения благородных металлов.

#### Выводы

1. Геологические особенности Северной Италии, выявленные и отработанные месторождения, показывают ограниченное распространение ТМО и необходимость их практического использования.

2. Российская идеология изучения процессов техногенеза и техногеогенеза, направленная на более полное извлечение твердых полезных ископаемых и извлечение металлов из формируемых в ТМО технологических вод может быть использовано на территории Италии.

3. Результаты экспериментов подтверждают [21], [22], [23] основную последовательность осаждения золота из золотоносных растворов, как поэтапный процесс с постепенным укрупнением первичных агрегатов нанозолота до размера микрочастиц.

4. Процесс осаждения и укрупнения золота на углях служит основой для разработки технологий освоения гидроминерального сырья, образующегося из технологических вод в пределах золотоносных ТМО.

5. Последующее использование ионообменных материалов, может повысить рентабельность отработки гидроминеральной составляющей ТМО.

#### Конфликт интересов

Не указан.

#### Conflict of Interest

None declared.

**Список литературы / References**

1. [Электронный ресурс] URL: [https://uchebniki-besplatno.com/geotektonika-geodinamika\\_1350/alpyi-43272.html/](https://uchebniki-besplatno.com/geotektonika-geodinamika_1350/alpyi-43272.html/) (дата обращения: 22.09.19)
2. Трюмпи Р. Тектоническое развитие центральных и западных Альп / Р. Трюмпи // Тектоника альпийской области: сб. статей. – Изд. Мир. М., 1965. – С. 9-121.
3. [Электронный ресурс] URL: <https://catalogmineralov.ru/deposit/italiy/> (дата обращения: 22.09.19)
4. [Электронный ресурс] URL: <http://tureks.ru/2018/07/italiya-poleznye-iskopaemye/> (дата обращения: 22.09.19)
5. Емлин Э.Ф. Техногенез колчеданных месторождений Урала. Свердловск: изд-во Урал. ун-та. – 1991. - С. 256.
6. Иванов О.К. Техногенез – новый генетический тип современных геологических процессов// Минералогия техногенеза. Миасс, 2002. С. 280.
7. Наумов В.А. Минерогения, техногенез и перспективы комплексного освоения золотоносного аллювия // Диссертация на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук / Пермский государственный университет. Пермь, 2010.
8. Пагано Р. Итальянское золото в Мюнхене [Текст] / Р. Пагано // 50 лет Мюнхенской ярмарке минералов: сб. статей. – Италия, 2013. – С. 74-75.
9. Наумов В.А. Перспективы освоения золота из природных и техногенно-минеральных образований западного Урала [Текст] / В.А. Наумов, О.Б. Наумова, А. Фиоруччи // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. – 2018. - №18. – С. 65-71.
10. Большая советская энциклопедия: в 30 т. / Гл. ред. А. М. Прохоров. — 3-е изд. — М. : Сов. энцикл., 1969 – 1978.
11. Фрайзе В. Ф. Транспортировка золота органическими подземными растворами [Текст] / В. Ф. Фрайзе // Экономический. Геология. 26. - 1931. – С. 412-431.
12. Боуэлл Р. Дж. Роль фульвокислоты в супергенной миграции золота в почвах тропических дождевых лесов [Текст] / Р. Дж. Боуэлл, А. П. Гизе, Р. П. Фостер // Геохим. Космохим. Аста 57. – 1993. – С. 4179-4190.
13. Као И. Механизмы миграции наночастиц золота, разведанных в geogas из Хэтай Рудный район, Южный Китай [Текст] / И. Као // Геохимия. Ж. 45. – 2011. – С. 9-13.
14. Зоб Д. Геохимия и минералогия контрастных зон изменения супергенного золота, Южная Новая Зеландия [Текст] / Д. Зоб, Г. Керр // Геохимия 85. – 2017. – С. 19-34.
15. Бишоф К. Г. О. Микробное накопление золота: пример из Венесуэлы [Текст] / К. Г. О. Бишоф, Р. Р. Coenraads, Ж. Ласка // Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Abh., 185. – 1992. – С. 131-159.
16. Накадзима А. Накопление золота микроорганизмами [Текст] / А. Накадзима // У. Ж. Микробиология. Биотехнологический. 19. – 2003. – С. 368-374.
17. Шустер Дж. Структурная и химическая характеристика зерен россыпного золота: влияние на вклад бактерий в формирование зерен [Текст] / Дж. Шустер, К. В. Джонстон, А. Н. Magarvey, А. Р. Гордон, К. Баррон, Н. Р. Банерджи, Г. Саутам // Геомикробиологический Журнал 32 (2). – 2015. – С. 158-169.
18. Хог Р. М. Наночастицы благородных металлов в Рудных системах [Текст] / Р. М. Хог, Р. П. П. Благородный, М. Рейх // Обзоры По Рудной Геологии, 42. – 2011. – С. 55-61.
19. Шустер Ж., «Рост» в пробирке золотых зерен [Текст] / Ж. Шустер, Г. Саутам // Геология 43 (1). – 2015. – С. 79-82.
20. Fiorucci A.; Moitre B. (2012) Hydrogeochemical study on the rare earth concentration in groundwater, In: ROMANIAN JOURNAL OF MINERAL DEPOSITS, pagine 56-59, ISSN: 1220-5648
21. Наумов В.А. Экспериментальные исследования по осаждению золота на углеродные нити [Текст] / В.А. Наумов Б.М. Осовецкий, М.А. Волкова // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П.Н. Чирвинского. - 2018. - № 21. - С. 69-74.
22. Волкова М.А. Экспериментальное моделирование процессов образования «нового» нанозолота [Текст] / М.А. Волкова, Б.М. Осовецкий // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. Пермь: Перм. ун-т. - 2016. - С. 50-54.
23. Наумов В.А. Механизмы накопления золота на углях / В.А. Наумов, Б.М. Осовецкий // Цветные металлы и минералы: сб. док. 9-го межд. конгресса. – 2017. - С. 952.
24. Наумов В.А. О механизме сорбции наночастиц золота углистым материалом [Текст] / В.А. Наумов, Б.М. Осовецкий // Геол. и полезн. иск. Зап. Ур. Пермь, - 2013. - С. 43–48.

**Список литературы на английском языке / References in English\***

1. [Electronic resource] URL: [https://uchebniki-besplatno.com/geotektonika-geodinamika\\_1350/alpyi-43272.html/](https://uchebniki-besplatno.com/geotektonika-geodinamika_1350/alpyi-43272.html/). (assessed: 22.09.19) [In Russian]
2. Trumpy R. Tektonicheskoye razvitiye tsentral'nykh i zapadnykh Al'p [Tectonic development of central and western Alps] / R. Trumpy // [Tectonics of the Alpine region: collection. Articles]. – М.: Mir, 1965. – P. 9-121. [in Russian]
3. [Electronic resource] URL: <https://catalogmineralov.ru/deposit/italiy/>. (assessed: 22.09.19) [in Russian]
4. [Electronic resource] URL: <http://tureks.ru/2018/07/italiya-poleznye-iskopaemye/>. (assessed: 22.09.19). [in Russian]
5. Emlin E.F. Tekhnogenez kolchedannykh mestorozhdeniy Urala. Sverdlovsk [Technogenesis of pyrite deposits of Urals. Sverdlovsk] – Ural univ. publishing house – 1991. – P. 256. [In Russian]
6. Ivanov O.K. Tekhnogenez – novyy geneticheskii tip sovremennykh geologicheskikh protsessov [Technogenesis – new genetic type of modern geological processes] / Ivanov O.K. // Mineralogiya tekhnogeneza [Mineralogy of technogenesis]. Miass, 2002. – P. 280. [in Russian]
7. Naumov V.A. Minerageniya, tekhnogenez i perspektivy kompleksnogo osvoyeniya zolotonosnogo allyuviya [Minerageny, technogenesis and prospects for integrated development of gold-bearing alluvium] / Naumov V.A. // Dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni doktora geologo-mineralogicheskikh nauk [Thesis for the degree of Doctor of Geological and Mineralogical Sciences] / Perm State University. Perm, 2010. [in Russian]

8. Pagano R. Ital'yanskoye zoloto v Myunkhene [Italian gold in Munich] [Text] / R. Pagano // 50 let Myunkhenskoj yarmarke mineralov: sb. statey [50 years of the Munich mineral fair: collection of Articles]. – Italy, 2013. – P. 74-75. [in Russian]
9. Naumov V.A. Perspektivy osvoyeniya zolota iz prirodnykh i tekhnogenno-mineral'nykh obrazovaniy zapadnogo Urala [Prospects for development of gold from natural and technogenic-mineral formations of the western Urals] / V.A. Naumov, O.B. Naumova, A. Fiorucci // Geologiya i poleznyye iskopayemyye Zapadnogo Urala [Geology and Minerals of the Western Urals] – 2018. – No. 18. – P. 65-71. [in Russian]
10. Bol'shaya sovetskaya entsiklopediya: v 30 t. [The Great Soviet Encyclopedia: in 30 tons] / Ed. by A.M. Prokhorov. – 3rd ed. – M.: Sov. Enycl., 1969 – 1978. [in Russian]
11. Freise V.F. Transportirovka zolota organicheskimi podzemnymi rastvorami [Transportation of gold by organic underground solutions] / V.F. Freise // Ekonomicheskij. Geologiya [Economic. Geology]. 26. – 1931. – P. 412-431. [in Russian]
12. Bowell R. J. Rol' ful'vokisloty v supergennoy migratsii zolota v pochvakh tropicheskikh dozhdevykh lesov [Role of fulvic acid in supergene migration of gold in soils of tropical rain forests] [Text] / R. J. Bowell, A. P. Gise, R. P. Foster // Geokhim. Kosmochim. Asta 57 [Geochem. Cosmochem. Asta 57]. – 1993. – P. 4179-4190. [in Russian]
13. Kao I. Mekhanizmy migratsii nanochastits zolota, razvedannykh v geogas iz Khetay Rudnyy rayon, Yuzhnyy Kitay [Mechanisms of migration of gold nanoparticles explored in geogas from Kheitai Rudny district, Southern China] [Text] / I. Kao // Geokhimiya [Geochemistry]. J. 45. – 2011. – P. 9-13. [in Russian]
14. Zob D. Geokhimiya i mineralogiya kontrastnykh zon izmeneniya supergennoy zolota, Yuzhnaya Novaya Zelandiya [Geochemistry and mineralogy of contrast zones of supergene gold changes, South New Zealand] [Text] / D. Zob, G. Kerr // [Geochemistry 85]. – 2017. – P. 19-34. [in Russian]
15. Bischof K. G. O. Mikrobnoye nakopleniye zolota: primer iz Venesuely [Microbial accumulation of gold: example from Venezuela] [Text] / K. G. O. Bischof, R. R. Coenraads, J. Lask // Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Abh., 185. – 1992. – P. 131-159. [in Russian]
16. Nakajima A. Nakopleniye zolota mikroorganizmami [Accumulation of gold by microorganisms] [Text] / A. Nakajima // [U. J. Microbiology. Biotechnological 19]. – 2003. – P. 368-374. [in Russian]
17. Schuster J. Strukturnaya i khimicheskaya kharakteristika zeren rossypnogo zolota: vliyaniye na vklad bakteriy v formirovaniye zeren [Structural and chemical characteristics of alluvial gold grains: effect on contribution of bacteria to formation of grains] [Text] / J. Schuster, K.V. Johnston, A. N. Magarvey, A. R. Gordon, K. Barron, N.R. Banerjee, G. Sautam // Geomikrobiologicheskij Zhurnal 32 (2) [Geomicrobiological Journal 32 (2)]. – 2015. – P. 158-169. [in Russian]
18. Hog R. M. Nanochastitsy blagorodnykh metallov v Rudnykh sistemakh [Nanoparticles of noble metals in Ore systems] [Text] / R. M. Hog, R. R. P. Noble, M. Reich // Obzory Po Rudnoy Geologii [Reviews on Ore Geology, 42]. – 2011. – P. 55-61. [in Russian]
19. Schuster J., «Rost» v probirke zolotykh zeren [“Growth” in vitro of golden grains] [Text] / J. Schuster, G. Sautam // Geologiya 43 (1). [Geology 43 (1)] – 2015. – P. 79-82. [in Russian]
20. Fiorucci A.; Moitre B. (2012) Hydrogeochemical study on the rare earth concentration in groundwater, In: ROMANIAN JOURNAL OF MINERAL DEPOSITS, pagine 56-59, ISSN: 1220-5648
21. Naumov V.A. Eksperimental'nyye issledovaniya po osazhdeniyu zolota na uglerodnyye niti [Experimental studies on the deposition of gold on carbon threads] [Text] / V.A. Naumov B.M. Osovetsky, M.A. Volkova // Problemy mineralogii, petrografii i metallogenii. Nauchnyye chteniya pamyati P.N. Chirvinskogo [Problems of mineralogy, petrography and metallogeny. Scientific readings in memory of P.N. Chirvinsky]. – 2018. – No. 21. – P. 69-74. [in Russian]
22. Volkova M.A. Eksperimental'noye modelirovaniye protsessov obrazovaniya «novogo» nanozolota [Experimental modeling of a “new” nanogold formation processes] [Text] / M.A. Volkova, B.M. Osovetsky // Geologiya i poleznyye iskopayemyye Zapadnogo Urala. Perm' [Geology and minerals of the Western Urals]. Perm: Perm. Univ. – 2016. – P. 50-54. [in Russian]
23. Naumov V.A. Mekhanizmy nakopleniya zolota na uglyakh [Mechanisms of gold accumulation on coal] [Text] / V.A. Naumov, B.M. Osovetsky // Tsvetnyye metally i mineraly: sb. dok. 9-go mezhd. kongressa [Non-ferrous metals and minerals: collection. doc 9th int. Congress]. – 2017. – P. 952. [in Russian]
24. Naumov V.A. O mekhanizme sorbtzii nanochastits zolota uglistym materialom [About mechanism of sorption of gold nanoparticles by carbonaceous material] [Text] / V.A. Naumov, B.M. Osovetsky // Geol. i polezn. isk. Zap. Ur. Perm' [Geol. and useful. lawsuit. West Ur Perm] – 2013. – P. 43-48. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.90.12.029>

**НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗОЛОТА ХАКАНДЖА, МНОГОВЕРШИННОЕ И БЕЛАЯ ГОРА (РОССИЯ)**

Научная статья

**Остапенко Н.С.<sup>1,\*</sup>, Нерода О.Н.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-9301-3684;

<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-1265-9203;

<sup>1,2</sup> Институт геологии и природопользования ДВО РАН, Благовещенск, Россия

\* Корреспондирующий автор (ostapenko\_ns[at]mail.ru)

**Аннотация**

Анализ материалов, собранных авторами статьи по месторождениям Хаканджа и Многовершинное, а также опубликованных предшественниками по этим же месторождениям и месторождению Белая Гора, позволил уточнить их генез. Общими чертами генезиса этих месторождений являются: 1) генетическая связь с магматическими очагами и с вулканическими процессами; 2) формирование золоторудной минерализации происходило на завершающих этапах вулканизма в пространственной и временной связи с формированием субвулканических и экструзивных тел; 3) локализация месторождений и рудных тел в наиболее тектонически нарушенных в предрудное время блоках пород под экранами слабопроницаемых пород верхних вулканических покровов; 4) формирование минерализации совершалось глубинными магмотогенными флюидами в проницаемых магмо- и флюидопроводниках, непосредственно в тепловых полях субвулканических и экструзивных тел в динамичном тектоническом режиме.

Отличительные особенности их формирования: месторождение Белая Гора сформировалось вслед за образованием экструзии, явившейся экраном для поступающих глубинных флюидов, а также генератором дополнительной тепловой энергии для увеличения давления флюида, способствовавшего образованию гидроразрывов во вмещающих породах, эксплозивному брекчированию некка и межпластовой минерализации на участке Пологий, под экраном покровных пород. Месторождение Хаканджа сформировалось вблизи некка палеовулкана в пологой зоне межформационного тектонического срыва вулканических толщ. Месторождение Многовершинное формировалось в крутозалегающих экранированных магмо- и флюидопроводниках в процессе накопления и конвекции флюидов в тепловых полях субвулканических тел.

**Ключевые слова** золоторудные месторождения, особенности формирования.

**SOME FEATURES OF GOLD DEPOSITS FORMATION OF KHAKANJA, MNOGOVERSHINNOYE AND BELAYA GORA (RUSSIA)**

Research article

**Ostapenko N.S.<sup>1,\*</sup>, Neroda O.N.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-9301-3684;

<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-1265-9203;

<sup>1,2</sup> Institute of Geology and Nature Management, FEB RAS, Blagoveshchensk, Russia

\* Corresponding author (ostapenko\_ns[at]mail.ru)

**Abstract**

The analysis of the materials collected by the authors of this paper on the Khakanja and Mnogovershinnoye deposits, as well as those published by predecessors on the same deposits and the Belaya Gora deposit, made it possible to clarify their genesis. The common features of the genesis of these deposits are as follows: 1) a genetic connection with magma pockets and with volcanic processes; 2) the formation of gold ore mineralization took place at the final stages of volcanism in spatial and temporal connection with the formation of subvolcanic and extrusive bodies; 3) the localization of deposits and ore bodies in the most tectonically disturbed rock blocks under the screens of poorly permeable rocks of the upper volcanic cover; 4) the formation of mineralization was carried out by deep magmatogenic fluids in permeable magma and fluid conductors, directly in the thermal fields of subvolcanic and extrusive bodies in a dynamic tectonic regime.

Distinctive features of their formation are as follows: the Belaya Gora deposit was formed following the extrusion formation, which was a screen for incoming deep fluids, as well as an additional heat energy generator to increase fluid pressure, which contributed to the formation of hydraulic fractures in the host rocks, explosive necca brecciation and interstratal mineralization at the Pologii site, under the cover rock screen. The Khakanja deposit was formed near the paleovolcano necca in a shallow zone of the interformational tectonic breakdown of volcanic strata. The Mnogovershinnoye deposit was formed in steeply shielded magma and fluid conductors during the accumulation and convection of fluids in the thermal fields of subvolcanic bodies.

**Keywords:** gold deposits, formation features.

**Введение**

Еще в 20-х годах XX века В. Линдгрэн [1] отнес многочисленные золоторудные месторождения вулканических поясов и комплексов к малоглубинным эпитермальным. С тех пор многие поколения геологов считают, что такие месторождения формировались в парагенетической связи с вулканиками, некками и субвулканическими интрузиями. Это не вызывает серьезных возражений у многих исследователей [2], [3], [4], в том числе и у авторов этой статьи. Однако совместный анализ собранных нами оригинальных геологических материалов по золоторудным месторождениям Востока России – Хаканджа, Многовершинное и опубликованных материалов другими

исследователями по этим месторождениям и месторождению Белая Гора, позволяет уточнить роль структурных элементов, вулканических покровов, субвулканических тел и экструзий в рудоформировании. На этом основании нами обосновывается более тесная, нежели парагенетическая, связь минерализации с субвулканическими интрузиями и экструзиями. Покажем рудоформирующую роль таких интрузий на примере трех вышеупомянутых месторождений, условия локализации которых значительно различаются.

**Хаканджинское месторождение** расположено вблизи города Охотск, в южном секторе Охотско-Чукотского вулканического пояса, непосредственно в южной части входящей в него Селемджинской вулcano-тектонической депрессии. Ее фундамент сложен дислоцированной толщей алевро-аргиллитов триаса. По [4], [5], [6] Хаканджинское месторождение приурочено к осевой части депрессии, где совмещается с унаследованным линейно-купольным поднятием. Оно контролируется пересечением разнонаправленных разломов. Поднятие сложено позднемиоценовыми покровными флюидальными и сферолитовыми риолитами, дацитами, их туфами и игнимбритами, а также экструзивными и субвулканическими образованиями (рис. 1). В ядерной части купола поднятия обнажена подстилающая кислые вулканические толщи нижнемеловых андезитов и их туфов.

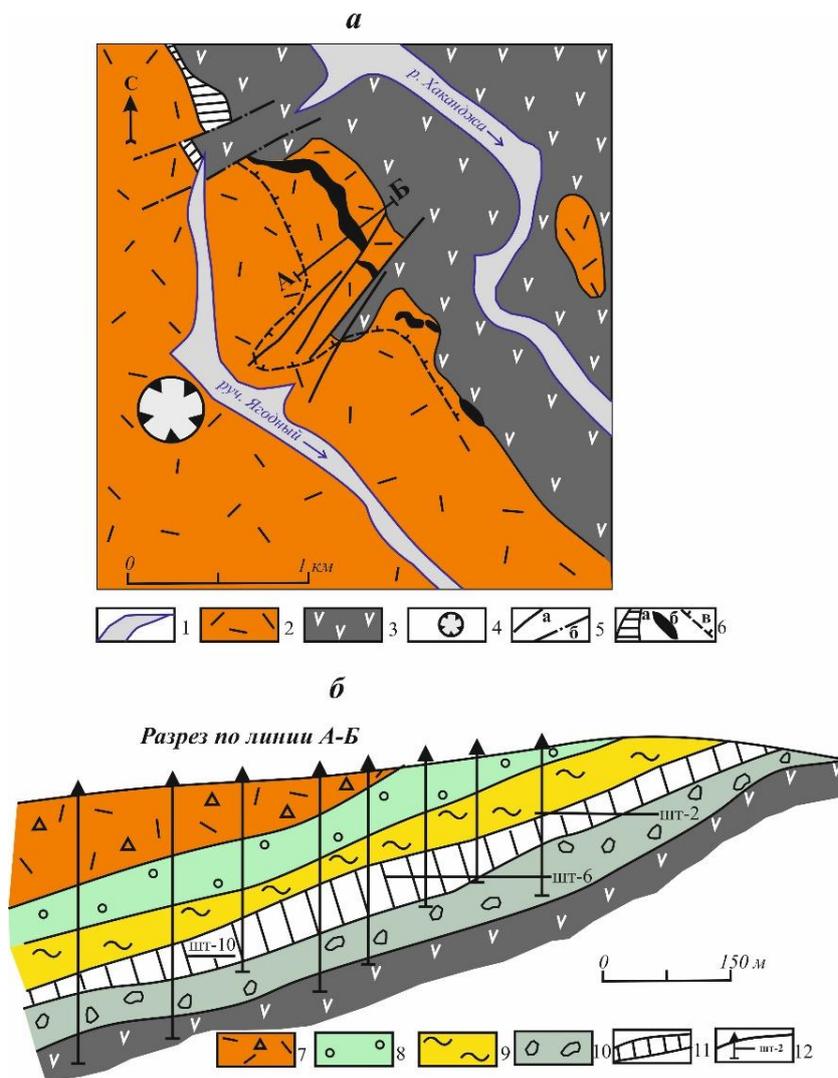


Рис. 1 – Схема геологического строения месторождения Хаканджа, Приохотье (по В.Г. Невструеву и Л.В. Эйришу [6] с дополнениями авторов): а – план, б – разрез:

1 – аллювий водотоков; 2 – покровные (амкинская свита) и субвулканические риодациты и дациты  $K_2$ ; 3 – андезиты и туфы ульбериканской свиты,  $K_1$ ; 4 – жерло палеовулкана; 5 – дайки андезитов и граносиенит-порфиров  $K_2$  (а) и тектонические нарушения (б); 6 – рудные зоны: штокверки (а), кварцевые жилы и зоны (б), проекция нижней границы промышленных руд (в). На разрезе: 7 – туфы дацитов и риолитов; 8 – сферолитовые риолиты; 9 – флюидальные риолиты; 10 – агломератовые туфы дацитов; 11 – жильно-прожилковая рудная зона; 12 – разведочные скважины и штольни

В толще кислых пород присутствуют силлы латитов и многочисленные дайки гранит-порфиров, гранодиоритов и палеогеновые дайки базальтов и андезитов. По периметру Селемджинской вулcano-тектонической структуры размещается несколько гранитоидных массивов.

Рудоносная минерализация сосредоточена в простирающейся на несколько километров в северо-западном направлении пологой зоне брекчированных, окварцованных и адуляризированных риолитов с кварцевыми жилами и прожилками общей мощностью 7–52 м, погружающейся на ЮЗ под углами  $15^\circ$ – $30^\circ$ . Эта структура представляет собой предрудный межформационный тектонический срыв контактовой зоны толщ риодацитов и андезитов. Продуктивная часть зоны расположена вблизи некка палеовулкана. Её протяженность по латерали более 1 км, а по падению около

300–600 м. Она экранируется малопроницаемыми флюидальными и сферолитовыми риолитами. Рудные тела в этой зоне выделяются по результатам опробования. Их обычная мощность 4–6 м, они располагаются параллельно и кулисно. Контур промышленных руд имеет [4] веерообразную форму или форму треугольника с вершиной в сторону нека палеовулкана (рис. 1, план). Здесь наиболее нарушенный участок зоны (максимальное количество поперечных нарушений и даек).

На месторождении преобладают сетчатые, брекчиевые и линейно-полосчатые текстуры руд. Неокатанные обломки пород в рудах, а также околорудные породы, обычно окварцованы и преобразованы в гидрослюдисто-адуляр-кварцевые метасоматиты. Цементирующий их кварц и кварц секущих прожилков относятся нескольким генерациям. Жильное выполнение имеет массивное сложение, тонкозернистую структуру, молочно-белый или серый цвет, а местами колломорфно-полосчатое строение с коккардовой и крустификационной текстурами. С кварцем ассоциирует адуляр. Сульфидов в рудах обычно около 0,5%. На глубоких горизонтах рудоносной зоны их количество увеличивается до 3%. Основные рудные минералы – золото, аргентит, электрум, полибазит, галенит, сфалерит, халькопирит, гематит, самородное серебро. Нерудные – кварц, адуляр, родонит, кальцит, манганкальцит.

Золото приурочено к интерстициям в агрегатах кварца, контактам зерен кварца и адуляра, а также кварца и обломков пород. Проба золота в ранних родонит-родохрозитовых рудах 609–774‰, составляет, в среднем, 627, а средняя по месторождению 536–544‰. Отношение в рудах Au:Ag = 1:20–110, наиболее низкое его значение характерно для верхних горизонтов месторождения.

В рудах всегда калий многократно преобладает над натрием ( $K_2O$  – 2,4-4%,  $Na_2O$  – 0,01-0,13). Обычное содержание золота в рудах менее 10-20 г/т, в богатых – до 50-100 г/т, а серебра соответственно 350–600 г/т и до 1–5 кг/т. Последние характерны для рудных столбов на средних и верхних горизонтах месторождения. С глубиной в рудных телах снижается проба золота, уменьшаются количества аргентита, галенита, повышаются количества арсенопирита (до 3%), полибазита, сфалерита, сульфосолей серебра и сидерита. Кроме золота и серебра в продуктивную стадию накапливались Pb, Zn, Mn, Cu, As, иногда Sb, W.

Крупное по запасам Многовершинное месторождение находится на территории Хабаровского края, в северной части Восточно-Сихотэ-Алинского вулканического пояса вблизи побережья Охотского моря. По [8, С. 242–249], [9, С. 125–135], оно размещается на территории широтно-ориентированного Улского тектоно-магматического грабена, осложняющего краевую часть Бекчи-Улского тектоно-магматического поднятия (рис. 2). Грабен сложен алевро-аргиллитовыми отложениями  $J_3$ – $K_1$ . Перекрывающие их вулканические покровные отложения представлены толщей андезитов  $K_2$ – $Pg_1$ . Прорывающий осадочные и вулканические отложения гранитоидный плутон палеогенового возраста, по данным различных исследователей, сформирован в несколько фаз. Рудоносные зоны с промышленными рудными телами размещаются в вулканогенных отложениях севернее плутона на различных от него расстояниях. И те, и другие приурочены к разломным зонам северо-восточного простирания, имеющим крутое падение на северо-запад. Вулканиды и подстилающие их осадочные породы в тектонических зонах передроблены и метасоматизированы. Особенно интенсивно разновозрастный метасоматоз проявился в толще вулканидов. Отчетливо выделяется ранняя пропилитизация андезитов, охватившая всю территорию рудного поля.

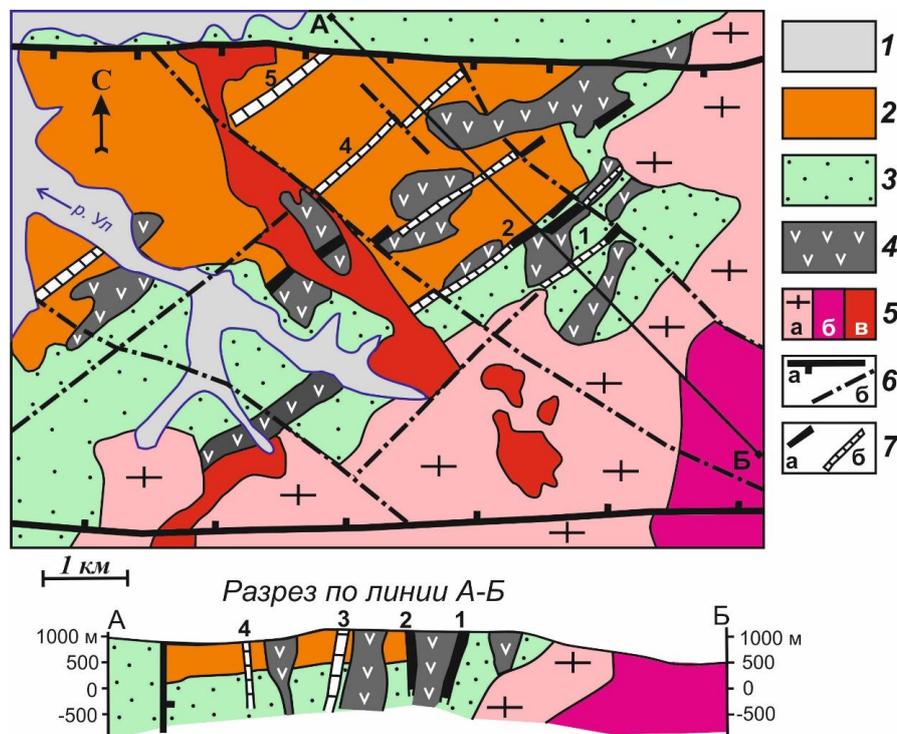


Рис. 2 – Геолого-структурная схема восточной части Многовершинного рудного поля (по Э.П. Хохлову, С.Н. Косову, из [8, С. 245]:

1 – аллювий; 2 – покровные андезиты ( $P_1$ ); 3 – осадочные породы фундамента ( $J_3$ – $K_1$ ); 4 – жерловые и субвулканические тела андезитов ( $P_1$ ); 5 – интрузивные породы ( $P_2$ ) Бекчи-Улского плутона ( $P_2$ ): гранодиориты (а), лейкократовые граниты (б), гранодиорит-порфиры (в); 6 – разломы; 7 – рудные тела (а) и рудоносные зоны (б)

Метасоматиты кислотного выщелачивания более позднего этапа имеют кварц-серицитовый и кварц-адюляр-серицитовый состав. Последние сосредоточены в осевых частях рудоносных тектонических зон и вмещают невыдержанные кварцевые жилы, прожилки и прожилковые зоны, обычно с небольшими количествами рудных минералов: пирита, арсенопирита, пирротина, сфалерита, галенита, блеклых руд, самородного золота, реже – аргентита, фрейбергита, пираргирита, алаита, петцита и др.. Проба самородного золота варьирует в пределах 750–850‰. Оно встречается в сростаниях с сульфидами и кварцем. Золото-серебряное отношение в рудах варьирует от 10 : 1 до 1 : 20, в среднем, составляет 1 : 1. Это результат многостадийности формирования месторождения и неравномерной совмещенности их продуктов. Исследователями отмечены некоторые элементы общей зональности минерализации: – с глубиной увеличивается количество сульфидов. На примере малоэродированного рудного тела Верхнее установлено усложнение строения по восстанию: ветвление, появление апофиз с висячего бока. Снизу-вверх растет мощность околорудных метасоматитов от 1–4 до 7–15 м; в верхней части рудного тела Верхнее увеличивается количество серебросодержащих минералов.

Непосредственно в узкой полосе вблизи контакта гранитоидного батолита в рудных телах отмечается возрастание пробности золота до 900–950 ‰, что связывается [8] с контактовым метаморфизмом. В таких участках также присутствуют поздние кварц-карбонатные жилы с вкрапленностью полиметаллов, появление турманилизации и скарнирования пород без существенной золотоносности. Эта поздняя минерализация связывается с этапом реювинации под воздействием флюидов гранитоидного плутона.

На месторождении наблюдается пространственная сопряженность золотоносных зон с экструзивными и субвулканическими телами (рис. 2). Разломы северо-восточного направления являлись основными магмо- и флюидопроводниками. Тесная пространственная связь промышленных рудных тел в этих зонах с субвулканическими телами позволяет нам считать связь между ними более тесной нежели парагенетическая. Имеются наблюдения, свидетельствующие о наложении сульфидной вкрапленности и кварцевых прожилков на субвулканические тела. Высокая эродированность рудовмещающей вулканогенной толщи и значительные концентрации золота в рудных телах, отмеченное их расщепление и выклинивание к поверхности, позволяют предполагать их формирование под экранами ненарушенных или слабо нарушенных верхних покровов, под которыми были сформированы и субвулканические тела.

Месторождение Белая гора располагается несколько южнее Многовершинного. Рудное поле сложено эоценовой толщей базальтов и андезито-базальтов кузнецовской свиты и останцами покровов перекрывающей толщи туфов кислых пород колчанской свиты. Покровные образования прорваны эоценовыми экструзиями трахидацитов и трахитов. Описание месторождения приводится по [8, С. 249–253]. Золоторудное месторождение связано с расширяющимся к поверхности экструзивным телом трахидацитов размером 800–750 м (рис. 3). Вмещающие его породы брекчированы и метасоматизированы (пропилитизация, кварц-серицитовый метасоматоз, аргиллизация). К северо-западу от Белогорского некка известны единичные дайки эруптивных брекчий трахидацитов длиной 1-2 км и мощностью до 100–200 м. Месторождение значительно эродировано, покровные туфы кислого состава колчанской свиты сохранились от эрозии к востоку от некка и лишь отчасти севернее.

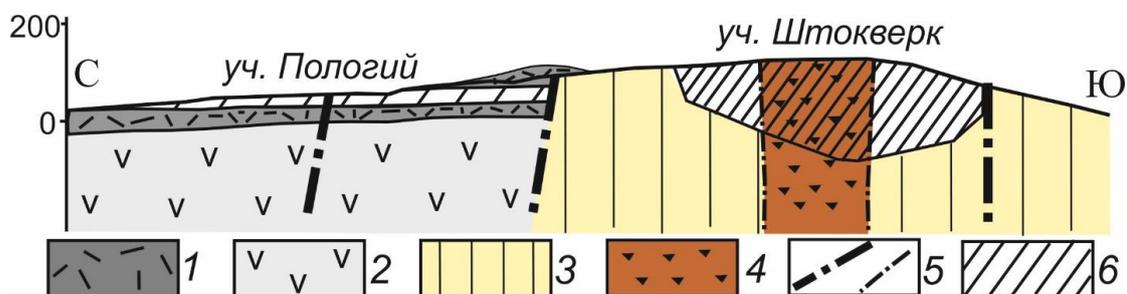


Рис. 3. Меридиональный геологический разрез месторождения Белая Гора (по данным Нижнеамурской горной компании, из [8, С. 251])

1 – эоценовые трахиты, трахидациты и их туфы колчанской свиты; 2 – эоценовые андезито-базальты кузнецовской свиты; 3 – олигоценая экструзия дацит-трахидацитового состава; 4 – олигоценые взрывные брекчии смешанного состава; 5 – тектонические нарушения; 6 – контуры рудных тел

Золотое оруденение локализуется в северо-западной части экструзии (участок Штокверк) и частично севернее, в вулканитах колчанской свиты (участок Пологий). Вмещающие месторождение вулканиты кислого состава гидротермально изменены во вторичные кварциты, вмещающие неравномерно распределенные прожилки кварца с золотом. Вкрапленность рудных минералов в рудах убогая. Средние содержания золота составляют 0,6–1,29 г/т. В рудных телах встречаются разрозненные обогащенные участки. Кварц в рудах обоих участков по текстурам разнообразен – брекчиевый, каркасный, полосчатый, шестоватый, сфероидальный.

На месторождении по данным поисково-оценочных работ выделено три типа рудных тел: 1) согласные с напластованиями покровных пород; 2) секущие толщи вулканитов; 3) сложной формы. Первый тип распространен на участке Пологий и включает основную долю промышленных руд месторождения. Мощность рудных тел составляет 0,5–15 м. Раздувы встречаются в местах пересечения с крутозалегающими нарушениями. Второй тип контролируется мелкими разрывами и представлен кварцевыми жилами выполнения мощностью до 25–25 см, зонами брекчий и прожилками кварца. Протяженность жил до нескольких десятков метров, залегание крутое.

Третий тип рудных тел более редок. Это обычно ветвящиеся по восстанию жилы, переходящие в штокверки. Руды прожилково-вкрапленные с невысокими равномерными содержаниями. Редко встречаются мелкие гнезда (10-15 см) с очень богатыми (до 1 кг/т) содержаниями золота.

На участке Штокверк распространены преимущественно второй и третий типы рудных тел – секущие и сложной формы обычно маломощные (до 10 см), невыдержанные. Содержания золота 10–20 г/т. Основную часть золота участка вмещают штокверковые тела по несколько десятков метров по мощности и простиранию. Они размещаются во взрывных брекчиях дацитов и трахидацитов, в центральных частях экструзивных зон. Эти руды малосернистые (серы 0,0%).

В межпластовых рудах участка Штокверк среднее соотношение Au:Ag = 1 : 11,6, а на участке Пологий оно равно 1 : 0,9. Содержание серы в рудах участка Пологий выше в 10 раз, нежели в рудах участка Штокверк, что коррелируется с общим содержанием сульфидов.

Гипогенные рудные минералы представлены пиритом, марказитом, сфалеритом, галенитом, арсенопиритом, самородным золотом, аргентитом, сульфоантимонитом серебра, штрмейеритом, гюбнеритом, тетрадимитом, пруститом, самородным серебром. Показателем вертикальной зональности является снижение с глубиной в рудах серебра и ртути. Руды месторождения формировались в один этап в три стадии: 1) дорудные метасоматические изменения вмещающих пород в пропилиты, гидрослюдисто-кварцевые с адуляром и диккитовые метасоматиты; 2) предрудное метасоматически-прожилковое окварцевание с сопутствующей серицитизацией и адуляризацией; 3) рудная – формирование кварцевых прожилков с рудной минерализацией.

Золото низкопробное (522–788‰), в среднем, 667 единиц. Запасы золота категории C<sub>2</sub> составляют 17 т со средним содержанием 3,4 г/т, забалансовые – около 49,8 т, прогнозные – ~ 10 т с содержанием 2,3 г/т. Исследователи месторождения считают связь золото-серебряной минерализации парагенетической с экструзивными телами и дайками колчанского магматического комплекса.

### **Обсуждение и выводы**

Золотоносные рудные узлы и рудные поля в вулканических поясах обычно размещаются в пространственной связи с глубинными разломами в наиболее тектонически нарушенных в предрудное время блоках пород фундамента [2], [4], [5], весьма проницаемых по этой причине для магм и магматогенных флюидов. Они пространственно связаны с вулканоплутоническими комплексами длительного накопления и динамичного развития. Это следует из многократности излияний магм на поверхность, часто в гомодромной последовательности развития магматических очагов, и внедрения в вулканические покровы экструзий, даек, штоков и плутонов.

Такие месторождения, в том числе и вышеохарактеризованные, формировались в подочаговом пространстве вблизи палеоповрхности, в основном, на этапах завершения развития магматических очагов. Это происходило на участках высокой нарушенности и проницаемости ранних вулканических покровов под экраном малонарушенных поздних покровов вулканитов, в тесной пространственной связи с субвулканическими или с экструзивными телами (месторождения Белая Гора, Хаканджа) на различных расстояниях от плутонов. Примером последней обстановки является Многовершинное золоторудное месторождение, размещающееся в северо-западной периферии Бекчи-Улского плутона (рис. 2). Гранитоидные плутоны на Хаканджинском месторождении находятся за пределами рудного поля [4]. Рудоконтролирующей являлась сближенная серия тектонических зон северо-восточного простирания – магмо- и флюидопроводников. Наблюдаемая пространственная ассоциация рудных зон и особенно промышленных рудных тел с экструзивными и субвулканическими телами свидетельствует об их близковременном формировании.

Источниками золота и флюидов для охарактеризованных месторождений несомненно были глубинные магматические очаги, как это обосновано расчетным методом нами [7] на материалах [10, с. 95–108] по Хаканджинскому месторождению с использованием результатов экспериментов по распределению золота между силикатным расплавом и флюидом [11].

Следовательно, из приведенных обстановок локализации золоторудных месторождений можно сделать вывод, что формировались они в генетической связи с магматическими очагами и в парагенетической связи с фациями вулканитов. Нижние нарушенные и, следовательно, проницаемые для флюидов покровы вулканических толщ, а также осадочные породы фундамента являлись зонами транспорта флюидов и рудолокализации; верхние не нарушенные вулканические толщи служили малопроницаемыми барьерами для флюидов и субвулканических тел. Под ними формировались богатые скопления руд.

Синвулканические тектонические нарушения, из-за многократных перемещений тектонических блоков фундамента ВТС, являлись путями проникновения магматических расплавов к поверхности и на поверхность в центрах извержений, и местами формирования экструзий и субвулканических тел, даек, а также длительного проникновения металлоносных магматогенных флюидов, особенно на завершающих стадиях дифференциации магматических очагов.

Тепловые поля субвулканических интрузий и экструзий являлись местом дополнительного подогрева и «управляемой» ими активной конвекции поступающего из магматического очага металлоносного флюида. Такие тела определяли пространственное размещение рудных тел, обычно в их верхней и боковой периферии и, фактически, выполняли основную рудоформирующую роль и предопределяли геохимическую зональность рудной минерализации.

Таким образом, общими чертами генезиса этих месторождений являются следующие: 1) формирование их на малых глубинах; 2) генетическая связь с магматическими очагами и с вулканическими процессами; 3) формирование золоторудной минерализации происходило на завершающих этапах вулканизма в пространственной и временной связи с формированием субвулканических и экструзивных тел; 4) локализация месторождений и рудных тел происходила в наиболее тектонически нарушенных в предрудное время блоках пород под экранами слабопроницаемых пород верхних вулканических покровов; 5) формирование минерализации совершалось глубинными магматогенными флюидами в проницаемых магмо- и флюидопроводниках, непосредственно в тепловых полях субвулканических и экструзивных тел в динамичном тектоническом режиме.

### **Отличительные особенности их формирования:**

– месторождение Белая Гора сформировалось вслед за образованием экструзии, явившейся одновременно экраном для поступающих глубинных флюидов из очага, а также генератором дополнительной тепловой энергии в

экранированной гидротермальной системе для увеличения давления флюида, способствовавшего возникновению серии гидроразрывов в некке и во вмещающих породах, эксплозивному брекчированию некка и формирование на участке Пологий межпластовой минерализации под экраном малопроницаемых пластов покровных пород;

– месторождение Хаканджа сформировалось вблизи некка палеовулкана в пологой зоне межформационного тектонического срыва вулканических толщ различного состава;

– Многовершинное месторождение формировалось в крутозалегающих экранированных магмо- и флюидопроводниках, в процессе накопления и конвекции глубинных флюидов в околоинтрузивных тепловых полях субвулканических тел.

#### Конфликт интересов

Не указан.

#### Conflict of Interest

None declared.

#### Список литературы / References

1. Lindgren W. Mineral Deposits / Lindgren W. – 1928. – 3rd ed. McGraw Hill, New York. – 1049 pp.
2. Константинов М.М. Золотое и серебряное оруденение вулканогенных поясов мира / Константинов М.М. – 1984. – М.: Недра. – 165 с.
3. Хомич В.Г. Типизация золото-серебряного оруденения / Хомич В.Г., Иванов В.В., Фатьянов И.И. – 1989. – Владивосток. – 290 с.
4. Стружков С.Ф. Провинция Охотско-Чукотского вулканогенного пояса / Стружков С.Ф. // Золоторудные месторождения России. – 2010. – М.: Акварель. – С. 213–241.
5. Хомич В.Г. Хаканджинское месторождение золота и серебра (геологическое строение, особенности размещения оруденения) / Хомич В.Г. // Рудные месторождения континентальных окраин. – 2000. – Вып. 1. – Владивосток: Дальнаука. – С. 140–169.
6. Невструев В.Г. Минералого-геохимическая зональность золото-серебряного месторождения Прихотья / Невструев В.Г., Эйриш Л.Б. // Минералогия метаморфических и рудных образований Дальнего Востока. – 1981. – Владивосток. – С. 35–39.
7. Остапенко Н.С. Хаканджинское эпитегрмальное золото-серебряное месторождение Прихотья (Россия): факторы локализации и условия формирования / Остапенко Н.С. Нерода О.Н. // Успехи современного естествознания. – 2016. – № 7. – М.: Академия Естествознания. – С. 137–141.
8. Константинов М.М. Сихотэ-Алинская провинция / Константинов М.М., Косовец Т.Н. // Золоторудные месторождения России. – 2010. – М.: Акварель. – С. 242–259.
9. Моисеенко В.Г. Золоторудные месторождения Востока России / Моисеенко В.Г., Эйриш Л.В. – 1996. – Владивосток: Дальнаука. – 352 с.
10. Федчин Ф.Г. Золото и серебро в магматизме Селемджинской вулканно-тектонической структуры (Прихотье) / Федчин Ф.Г., Мальцев В.Г., Залевский С.Н., Куличенко А.Г. // Геохимия вулканических зон Дальнего Востока. – 1978. – Владивосток. – С. 95–108.
11. Миронов А.Г. Экспериментальные исследования геохимии золота с помощью метода радиоактивных изотопов / Миронов А.Г., Альмухамедов А.И., Гелетий В.Ф. и др. – 1989. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд. – 281 с.

#### Список литературы на английском языке / References in English

1. Lindgren W. Mineral Deposits / Lindgren W. – 1928. – 3rd ed. McGraw Hill, New York. – 1049 pp.
2. Konstantinov M.M. Zolotoye i serebryanoye orudneniye vulkanogennykh poyasov mira [Gold and silver mineralization of the volcanic zones of the world] / Konstantinov M.M. – 1984. – М.: Nedra. – 165 p. [in Russian]
3. Khomich V.G. Tipizatsiya zoloto-serebryanogo orudneniya [Typification of gold-silver mineralization] / Khomich V.G., Ivanov V.V., Fatyano I.I. – 1989. – Vladivostok. – 290 p. [in Russian]
4. Struzhkov S.F. Provintsiya Okhotsko-Chukotskogo vulkanogennoy poyasa [The Province of the Okhotsk-Chukchi Volcanogenic Belt] / Struzhkov S.F. // Zolotorudnyye mestorozhdeniya Rossii. – 2010. – М.: Akvarel. – P. 213–241. [in Russian]
5. Khomich V.G. Khakandzhinskoye mestorozhdeniye zolota i serebra (geologicheskoye stroeniye, osobennosti razmeshcheniya orudneniya) [Khakanja gold and silver deposit (geological structure, features of mineralization)] / Khomich V.G. // Rudnyye mestorozhdeniya kontinental'nykh okrain. – 2000. – Vol. 1. – Vladivostok: Dal'nauka. – P. 140–169. [in Russian]
6. Nevstruyev V.G. Mineralogo-geokhimicheskaya zonalnost zoloto-serebryanogo mestorozhdeniya Priokhotya [Mineralogical and geochemical zoning of the gold-silver deposit Priokhotya] / Nevstruyev V.G., Eyriish L.B. // Mineralogiya metamorficheskikh i rudnykh obrazovaniy Dalnego Vostoka. – 1981. – Vladivostok. – P. 35–39. [in Russian]
7. Ostapenko N.S. Khakandzhinskoye epitermal'noye zoloto-serebryanoye mestorozhdeniye Priokhotya (Rossiya): faktory lokalizatsii i usloviya formirovaniya [Khakanja epithermal gold-silver deposit Priokhotya (Russia): localization factors and formation conditions] / Ostapenko N.S. Neroda O.N. // Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya. – 2016. – № 7. – М.: Akademiya Yestestvoznaniya. – P. 137–141. [in Russian]
8. Konstantinov M.M. Sikhote-Alinskaya provintsiya [Sikhote-Alin Province] / Konstantinov M.M., Kosovets T.N. // Zolotorudnyye mestorozhdeniya Rossii. – 2010. – М.: Akvarel. – P. 242–259. [in Russian]
9. Moiseyenko V.G. Zolotorudnyye mestorozhdeniya Vostoka Rossii [Gold ore deposits of the East of Russia] / Moiseyenko V.G., Eyriish L.V. – 1996. – Vladivostok: Dal'nauka. – 352 p.
10. Fedchin F.G. Zoloto i serebro v magmatizme Seledzhinskoy vulkanno-tektonicheskoy struktury (Priokhotye) [Gold and silver in the magmatism of the Seledzhinsky volcanic-tectonic structure (Priokhotye)] / Fedchin F.G., Maltsev V.G., Zalevskiy S.N., Kulichenko A.G. // Geokhimiya vulkanicheskikh zon Dalnego Vostoka. – 1978. – Vladivostok. – P. 95–108. [in Russian]
11. Mironov A.G. Eksperimentalnyye issledovaniya geokhimii zolota s pomoshchyu metoda radioaktivnykh izotopov [Experimental studies of gold geochemistry using the method of radioactive isotopes] / Mironov A.G., Almukhamedov A.I., Geletiy V.F. et al. – 1989. – Novosibirsk: Nauka. Sib. otd. – 281 p.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.90.12.030>

## ОСОБЕННОСТИ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ РЕК И ОЗЕР ХМАО-ЮГРЫ

Научная статья

Романова Т.И.<sup>1,\*</sup>, Самарин В.А.<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия

\* Корреспондирующий автор (tirom[at]inbox.ru)

### Аннотация

В работе рассмотрен химический состав поверхностных вод (рек и озер) и донных отложений на территории Ханты-Мансийского автономного округа-Югры, выявлены условия формирования химического состава вод и перехода химических элементов из жидкого состояния в твердую фазу. Представлена методика анализа химического состава поверхностных вод и донных отложений, основанная на совместном применении методов кластерного и корреляционного анализа. Изучены взаимосвязи между химическими элементами в системе вода – донные отложения.

**Ключевые слова:** реки, озера, химический состав, донные отложения, корреляционный анализ, кластерный анализ.

## FEATURES OF CHEMICAL COMPOSITION OF SURFACE WATERS AND BOTTOM SEDIMENTS IN RIVERS AND LAKES OF KHMAD-YUGRA

Research article

Romanova T.I.<sup>1,\*</sup>, Samarin V.A.<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Ugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia

\* Corresponding author (tirom[at]inbox.ru)

### Abstract

The paper considers the chemical composition of surface waters (rivers and lakes) and bottom sediments in the Khanty-Mansiysk Autonomous District-Yugra, reveals the conditions for the formation of the chemical composition of water and the transition of chemical elements from liquid to a solid phase. A technique for analyzing the chemical composition of surface water and bottom sediments based on the combined use of cluster and correlation analysis methods is presented in the paper. The relationships between chemical elements in the water, bottom sediment system are studied as well.

**Keywords:** rivers, lakes, chemical composition, bottom sediments, correlation analysis, cluster analysis.

### Введение

Большая протяженность гидрографической сети и высокая заозеренность территории привлекает внимание многих исследователей. Обь-Иртышский бассейн занимает площадь свыше 2,47 млн. км<sup>2</sup>, включая территорию Ханты-Мансийского автономного округа – Югры (Югра) [4, С. 8]. Условия формирования химического состава водных объектов зависят от многих природных факторов (климатические особенности, особенности рельефа, интенсивность водообмена, характер геохимической среды и т.д.) [2, С. 56], [13, С. 87]. Это находит отражение в разнообразии геохимических типов вод с одной стороны и оказывает влияние на накопление макро- и микрокомпонентов в водах или перехода их в твердую фазу с другой. Особенности природных условий и факторы, влияющие на формирование химического состава поверхностных и подземных вод, изучались многими учеными, но постоянно меняющиеся условия геохимической обстановки, а также активная деятельность человека при освоении новых территорий вносит свои коррективы в естественные природные условия окружающей среды [1, С.73].

Исследование особенностей химического состава водотоков и водоемов, а также характер перераспределения химических элементов в системе вода – донные отложения определяет цель данной работы. На основе проведенного анализа появляется возможность оценить масштабы влияния нефтегазового комплекса на природные объекты, расположенные на территории Югры, и в дальнейшем изучить условия миграции химических элементов с учетом их геохимической подвижности.

### Характеристика района исследований

Площадь исследований охватывает большую часть Югры, в основном это Ханты-Мансийский, Кондинский, Нефтеюганский и Нижневартовский районы.

Большая часть округа расположена в пределах средней тайги. Гидросеть представлена огромным количеством водотоков и водоемов, что объясняется благоприятными климатическими, геоморфологическими, гидрогеологическими условиями (избыточным увлажнением, равнинным характером рельефа, наличием слабопроницаемых отложений, препятствующих фильтрации атмосферных осадков, близкий уровень залегания грунтовых вод и др.). Основной водной артерией является р.Обь с её многочисленными притоками – р.Иртыш, Салым, Назым, Казым и др. Все водотоки на площади исследования характеризуются широкими долинами, очень малыми уклонами, меандрирующими руслами с протоками, рукавами и озерами. Последних на территории округа довольно большое количество. Заозеренность округа, по данным [5, С. 11], свыше 6,3%. Большинство озер являются внутриболотными и расположены они преимущественно на заболоченных водоразделах. Заболоченность составляет 50-70% и более [4, С. 3]. Болота развиты на всех формах рельефа, их глубина частенько превышает 2 м, а мощность торфа достигает 5-10 м [5, С. 7].

В питании поверхностных вод округа принимают участие преимущественно талые снеговые воды (более 50%). Дождевые и подземные воды не являются основным источником питания рек, озер и болот, на их долю приходится 20-35% и 15-25% соответственно.

На наиболее дренированных участках почвенный покров представлен подзолистыми почвами, по долинам рек – аллювиальными пойменными отложениями, и торфяно-болотными почвами на самых низких отметках рельефа. На самых высоких отметках рельефа встречаются верховые болота, также с торфяно-болотными почвами.

В геологическом отношении площадь исследований представляет собой центральную часть Западно-Сибирской эпипалеозойской плиты, имеет двухъярусное строение. Нижний этаж (фундамент) сложен сильнодислоцированными и метаморфизованными породами докембрия и палеозоя. Верхний этаж (платформенный чехол) – в основном породами юрской и меловой систем мезозоя и более рыхлыми отложениями кайнозоя.

#### Методика исследований

Данная работа основана на материалах эколого-геохимических исследований 2008-2015 гг. Опробование вод рек и озер проводилось на лицензионных участках в меженьный период – в конце августа - сентябре. Точки отбора донных отложений совпадают с пунктами отбора поверхностных вод. Определение макрокомпонентов поверхностных вод и донных отложений осуществлялось в лаборатории «ЮганскНИПИ» методами титриметрии, потенциометрии, турбидиметрии, ионной хроматографии. Для определения микрокомпонентов использовался метод атомно-эмиссионной спектроскопии.

Статистическая обработка геохимических данных велась в программах MS Excel, StatSoft Statistica и др.

#### Результаты и обсуждение

Систематизированные результаты многолетних исследований химического состава поверхностных вод и донных отложений приведены в таблице 1. Воды рек отличаются по химическому составу от вод озер. Например, в водоемах кислотно-щелочная среда более кислая, чем в водотоках. Общая минерализация меняется от ультрапресных до умеренно пресных. При этом более высокие значения общей минерализации характерны для водотоков более крупных рек (до 250 мг/дм<sup>3</sup>), а в малых реках и озерах воды мало минерализованы – до 100 мг/дм<sup>3</sup>. Более высокие содержания анионов (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) наблюдаются в реках округа, но при этом среднее значение хлорид-ионов в озерных водах выше. Катионный состав разнообразен: кальций и магний находится в более высоких концентрациях в поверхностных водах рек, а натрий и калий – в водах озер. Для всех исследованных рек характерен гидрокарбонатный кальциевый состав (по С.А. Щукареву), иногда кальциево-магниевый или кальциево-натриевый. Анионно-катионный состав водоемов не так стабилен. Воды озер по химическому составу меняются от хлоридно-гидрокарбонатных натриевых до гидрокарбонатно-хлоридных натриевых, гидрокарбонатно-сульфатных кальциево-магниевых, реже гидрокарбонатных кальциево-натриево-магниевых.

Таблица 1 – Содержание химических элементов в поверхностных водах

Компоненты	Югра		ЯНАО		Кларк речных вод [11]
	реки	озера	реки	озера	
1	2	3	4	5	6
pH, ед.pH	<u>4,92-7,9</u> 6,46	<u>4,62-6,86</u> 5,80	<u>4,83-6,54</u> 6,01	5,06	-
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	<u>0,06-22,55</u> 4,40	<u>0,29-8,96</u> 2,53	<u>3,26-12,62</u> 6,74	3,73	-
Cl <sup>-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	<u>01-16,1</u> 3,22	<u>0,07-9,33</u> 4,07	<u>1,33-7,72</u> 4,17	1,26	5,5
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	<u>&lt;0,01-0,09</u> -	<0,01	<u>&lt;0,01-0,011</u> -	<0,01	
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	<u>0,01-2,84</u> 0,48	<u>0,01-0,37</u> 0,14	<u>0,02-0,67</u> 0,37	0,67	
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	<u>0,01-0,70</u> 0,23	<u>0,02-0,44</u> 0,15	<u>0,23-0,45</u> 0,33	0,31	
Ca <sup>2+</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	<u>0,99-1,58</u> 1,30	<u>0,35-2,35</u> 0,99			12,00
Mg <sup>2+</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	<u>0,30-0,53</u> 0,39	<u>0,16-0,50</u> 0,31			2,90
Na <sup>+</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	<u>0,43-0,83</u> 0,66	<u>0,09-12,71</u> 4,13			5,00
K <sup>+</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	<u>0,09-0,14</u> 0,11	<u>0,07-0,32</u> 0,19			2,00
Fe общее, мг/дм <sup>3</sup>	<u>0,32-5,50</u> 1,48	<u>0,091-1,25</u> 0,60	<u>0,11-0,99</u> 0,40	0,83	0,04
Mn, мг/дм <sup>3</sup>	<u>0,023-0,440</u> 0,096	<u>0,004-0,120</u> 0,044	<u>0,011-0,080</u> 0,038	0,040	0,010
Pb, мг/дм <sup>3</sup>	<u>0,0017-0,0160</u> 0,0035	<u>&lt;0,001-0,0013</u> -	<u>0,0023-0,0037</u> 0,0029	0,0024	0,0010

Окончание табл. 1 – Содержание химических элементов в поверхностных водах

Компоненты	Югра		ЯНАО		Кларк речных вод [11]
	реки	озера	реки	озера	
1	2	3	4	5	6
Zn, мг/дм <sup>3</sup>	<u>0,0010-0,1000</u> 0,0190	<u>0,0089-0,0280</u> 0,0130	<u>0,0056-0,0120</u> 0,0078	0,0072	0,0200
Cu, мг/дм <sup>3</sup>	<u>0,0035-0,0220</u> 0,0108	<u>0,0027-0,0160</u> 0,0112	<u>0,0013-0,0047</u> 0,0026	0,0050	0,0070
Ni, мг/дм <sup>3</sup>	<u>0,0050-0,0320</u> 0,0160	<0,001	<u>&lt;0,001-0,0012</u> -	0,0011	0,0025
Cr, мг/дм <sup>3</sup>	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	0,001
БПК, мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	<u>1,50-3,51</u> 2,27	<u>1,58-2,88</u> 2,34	<u>1,36-2,28</u> 1,78	1,98	
Нефтепродукты, мг/дм <sup>3</sup>	<u>0,006-0,070</u> 0,030	<u>0,010-0,070</u> 0,037	<u>0,024-0,050</u> 0,036	0,049	
Количество проб	90	10	27	1	

Примечание: в числителе приведен размах значений – минимум - максимум, в знаменателе – среднее значение

Отличительной особенностью Западной Сибири [6, С. 31] является повышенное содержание в поверхностных водах железа и марганца. На территории Ханты-Мансийского автономного округа – Югры воды также характеризуются высокими значениями данных компонентов, превышающими кларк речных вод [11, С. 9], достигая в среднем по железу – 1,48 мг/дм<sup>3</sup> и по марганцу – 0,096 мг/дм<sup>3</sup> в речных водах (табл.1). Их средние концентрации понижаются в водах озер до 0,6 мг/дм<sup>3</sup> и 0,044 мг/дм<sup>3</sup> соответственно.

Также в водоемах, по сравнению с речными водами, отмечены низкие показатели цинка, свинца, никеля (табл. 1). Однако, особенности питания озер и другие факторы [14, С. 100], влияющие на химический состав водной среды по сравнению с речными водами, приводят к накоплению органической составляющей, в частности суммарных углеводов. Чем больше влияние болотных массивов на водоемы, тем выше фиксируется концентрация нефтепродуктов.

Отличия в химическом составе водотоков и водоемов очень хорошо прослеживаются и по составу донных отложений (табл. 2). Более кислой реакцией среды характеризуются отложения озер, где pH в среднем равно 4,96, а в русловых отложениях pH – 5,84. По сравнению с аллювиальными осадками озерные отложения характеризуются повышенным содержанием макрокомпонентов (сульфатов, хлоридов, фосфатов, ионов аммония, кальция, магния, натрия) и пониженным содержанием нитратов.

Таблица 2 – Содержание химических элементов в донных отложениях рек и озер

Компоненты	Югра		ЯНАО	
	реки	озера	реки	озера
pH, ед.pH	<u>4,12-7,73</u> 5,84	<u>3,77-6,19</u> 4,96	<u>4,95-5,26</u> 4,95	4,64
Cr, мг/кг	<u>3,15-57,7</u> 12,16	<u>6,3-51,1</u> 17,93	<u>6,09-16,51</u> 9,45	7,89
Fe общее, мг/кг	<u>21,45-32000</u> 8691,68	<u>137-9041</u> 3404,88	<u>3204,88-8455,76</u> 4853,54	4130,10
Mn, мг/кг	<u>6,8-1170,0</u> 168,0	<u>6,7-590</u> 103,71	<u>109,46-273,72</u> 204,02	139,22
Pb, мг/кг	<u>0,06-13,10</u> 3,81	<u>1,5-32,0</u> 9,05	<u>1,05-4,16</u> 1,86	4,20
Zn, мг/кг	<u>1,2-68,0</u> 19,4	<u>1,0-38,8</u> 16,9	<u>3,6-14,9</u> 9,1	7,0
Cu, мг/кг	<u>0,19-30,00</u> 5,02	<u>0,39-11,6</u> 3,95	<u>1,18-5,18</u> 2,97	3,03
Ni, мг/кг	<u>0,43-83,40</u> 8,18	<u>0,046-9,80</u> 3,87	<u>1,29-3,73</u> 2,40	3,34
Cr, мг/кг	<u>0,43-66,00</u> 13,22	<u>1,10-16,10</u> 5,44	<u>1,26-4,71</u> 2,17	2,62
Нефтепродукты, мг/кг	<u>0,44-273,20</u> 77,11	<u>27,18-233,15</u> 108,51	<u>72,70-169,76</u> 106,62	139,75
Количество проб	92	10	27	1

Примечание: в числителе приведен размах значений – минимум - максимум, в знаменателе – среднее значение

В распределении железа общего и марганца в донных отложениях на территории Югры также наблюдается четкая закономерность: концентрации в русловых отложениях рек значительно отличаются от осадков водоемов (табл. 2). Похожая картина и по микроэлементам: содержания цинка, меди, никеля и хрома резко падают в озерах. Вероятно

гидрологические условия, геохимическая обстановка формирования озерной воды оказывает существенное влияние на процессы накопления и перехода химических элементов из жидкого состояния в осадок.

Выявленные закономерности в распределении химических элементов в составе водотоков и водоемов на территории Югры подтверждаются работами [3] и результатами исследований авторов, проведенных на севере Тюменской области (табл. 1, 2). На отдельных лицензионных участках, расположенных в южной части Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО) были изучены поверхностные воды и донные отложения малых и средних рек и одного озера. Согласно исследованиям, воды и донные отложения водоемов характеризуются более кислой средой, низкими показателями сульфатов, хлоридов и цинка. При этом, в озерах увеличиваются содержания нитратов и нефтепродуктов. А в распределении железа общего, марганца и свинца в водах и донных осадках отмечается обратная зависимость, т.е. если в водах озер по сравнению с реками наблюдается увеличение этих компонентов, то в донных осадках концентрации этих элементов будут ниже, чем в речных.

Для определения взаимозависимости между элементами химического состава исследуемых объектов были проведены кластерный и корреляционный анализы.

В связи с неоднородностью единиц измерения данных для проведения кластерного анализа применена стандартизация данных по формуле [12, С. 85]:

$$x_i^* = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma}$$

где  $x_i$  – значение концентрации вещества;  $\bar{x}$  – среднее значение концентрации вещества;  $\sigma$  – стандартное отклонение.

Статистическая обработка геохимических данных кластерным анализом выполнена методом Варда. В отличие от других методов кластерного анализа для оценки расстояний между кластерами, здесь используются методы дисперсионного анализа. На каждом шаге алгоритма объединяются такие два кластера, которые приводят к минимальному увеличению целевой функции, т.е. внутригрупповой суммы квадратов. Этот метод направлен на объединение близко расположенных кластеров и «стремится» создавать кластеры малого размера.

Получившаяся группировка по кластерам для химических элементов речных вод ЯНАО выявила две группы элементов (рис. 1). В одну группу вошли Mn, Zn, Pb, Cu, Fe и нефтепродукты; в другую – хлориды, сульфаты и pH. Корреляционная матрица, представленная в таблице 3, подтверждает и объясняет получившуюся разбивку по кластерам. Внутригрупповая корреляция между элементами является прямой, а для разных групп – обратной.

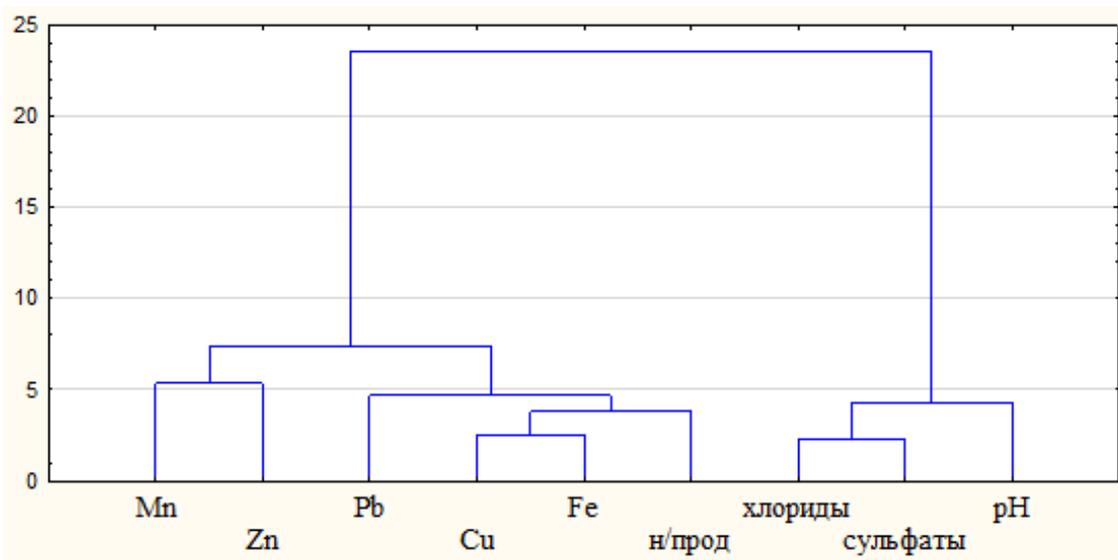


Рис. 1 – Кластерная диаграмма химических элементов в водах рек ЯНАО

Таблица 3 – Значения коэффициентов линейной корреляции концентраций химических элементов в водах рек ЯНАО (цветом выделено разбиение элементов по кластерам)

Данные	pH	Сульфаты	Хлориды	Нефте-продукты	Pb	Zn	Fe	Mn	Cu
pH	1,000								
Сульфаты	0,670	1,000							
Хлориды	0,772	0,897	1,000						
Нефте-продукты	-0,804	-0,201	-0,324	1,000					
Pb	-0,678	-0,326	-0,532	0,653	1,000				
Zn	-0,512	-0,636	-0,781	0,191	0,471	1,000			
Fe	-0,962	-0,662	-0,758	0,802	0,634	0,564	1,000		
Mn	-0,260	-0,096	-0,170	0,308	0,423	0,452	0,331	1,000	
Cu	-0,891	-0,643	-0,791	0,730	0,707	0,630	0,878	0,399	1,000

Таким образом, получили деление компонентов химического состава на два кластера, при котором увеличение одной величины в пределах кластера сопровождается увеличением остальных величин кластера, и уменьшением величин другого кластера.

В результатах, полученных для донных отложений рек ЯНАО (рис. 2 и табл. 4) также прослеживается уже описанная выше тенденция разбиения на два кластера, в зависимости от прямой и обратной корреляции. Однако, в отличие от водной среды в русловых отложениях рек ЯНАО, деление уже не такое четкое, внутри второго кластера наблюдается выделение меди и никеля в отдельную подгруппу, что объясняется их более высокой взаимозависимостью между собой, чем с другими компонентами.

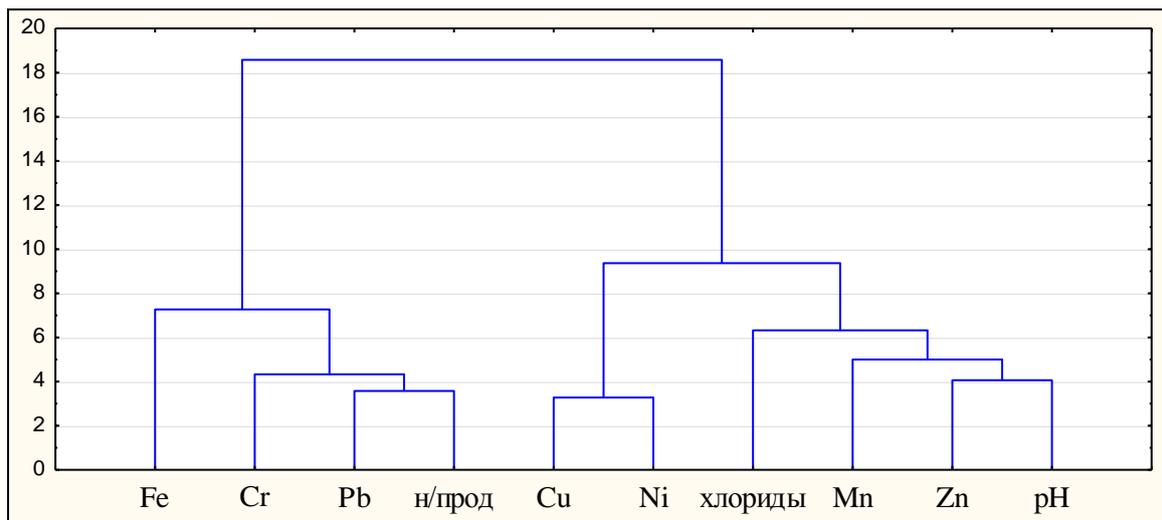


Рис. 2 – Кластерная диаграмма химических элементов донных отложений рек ЯНАО

Таблица 4 – Значения коэффициентов линейной корреляции концентраций химических элементов в донных отложениях рек ЯНАО

Данные	pH	Хло-риды	Нефте-продукты	Pb	Zn	Ni	Cr	Fe	Mn	Cu
pH	1,000									
Хлориды	0,513	1,000								
Нефте-продукты	-0,399	-0,732	1,000							
Pb	-0,384	-0,730	0,839	1,000						
Zn	0,650	0,325	-0,222	-0,021	1,000					
Ni	0,282	-0,158	0,194	0,414	0,678	1,000				
Cr	-0,429	-0,504	0,573	0,391	-0,580	-0,175	1,000			
Fe	-0,354	-0,344	0,226	0,323	-0,168	-0,182	0,068	1,000		
Mn	0,579	0,500	-0,480	-0,353	0,545	0,186	-0,273	-0,045	1,000	
Cu	0,258	-0,232	0,301	0,439	0,610	0,785	-0,114	0,102	0,251	1,000

Группировка по кластерам для химических элементов в донных отложениях рек Югры представлена на рисунке 3. Получившееся разбиение объясняется двумя факторами: четкая прямая связь между элементами Cu, Ni, Cr, Zn и обратная – между pH и сульфатами (табл. 5).

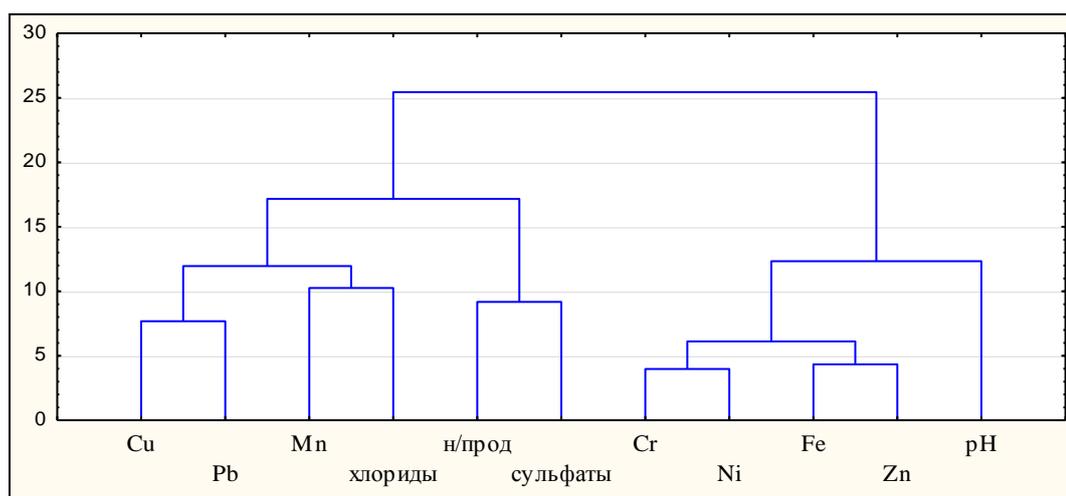


Рис. 3 – Кластерная диаграмма химических элементов донных отложений рек Югры

Таблица 5 – Значения коэффициентов линейной корреляции концентраций химических элементов в донных отложениях рек Югры

Данные	pH	Сульфаты	Хлориды	Нефтепродукты	Pb	Zn	Ni	Cr	Fe	Mn	Cu
pH	1,000										
Сульфаты	-0,848	1,000									
Хлориды	-0,193	0,231	1,000								
Нефтепродукты	-0,528	0,473	0,203	1,000							
Pb	-0,084	0,223	0,179	-0,044	1,000						
Zn	0,440	-0,387	0,109	-0,223	0,195	1,000					
Ni	0,492	-0,402	0,125	-0,264	0,257	0,820	1,000				
Cr	0,462	-0,426	-0,050	-0,217	0,059	0,820	0,902	1,000			
Fe	0,349	-0,336	0,066	-0,110	0,265	0,882	0,817	0,882	1,000		
Mn	0,338	-0,244	0,335	-0,213	0,320	0,647	0,605	0,435	0,545	1,000	
Cu	0,118	-0,067	0,223	0,054	0,631	0,406	0,639	0,433	0,490	0,502	1,000

Анализ вод озер Югры позволил выделить большую группу элементов с прямой корреляцией – это Zn, Pb, Ni, Fe, Mn, pH и сульфаты. Выделение нефтепродуктов и хлоридов в отдельную группу обосновано их высокой взаимозависимостью, при незначительной корреляции с другими элементами (рис. 4 и табл. 6). Элемент Cu показал обратную связь со всеми рассматриваемыми элементами, присоединение его к группе нефтепродуктов и хлоридов носит формальный характер.

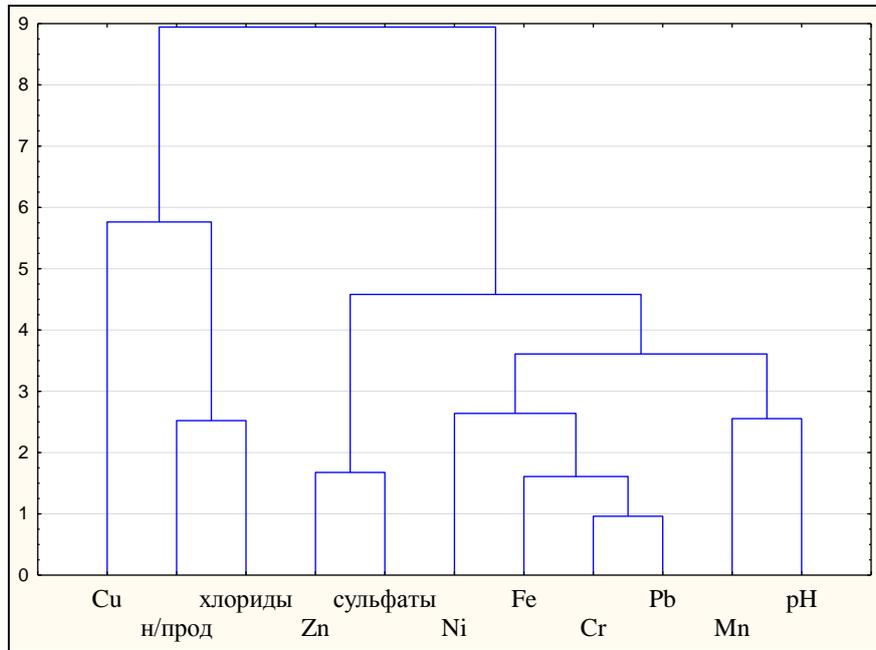


Рис. 4 – Кластерная диаграмма химических элементов в водах озер Югры

Таблица 6 – Значения коэффициентов линейной корреляции концентраций химических элементов в водах озер Югры

Данные	pH	Сульфаты	Хлориды	Нефте-продукты	Pb	Zn	Ni	Cr	Fe	Mn	Cu
pH	1,000										
Сульфаты	0,539	1,000									
Хлориды	-0,128	0,076	1,000								
Нефте-продукты	-0,507	-0,087	0,646	1,000							
Pb	0,552	0,529	0,421	0,006	1,000						
Zn	0,469	0,844	-0,283	-0,231	0,331	1,000					
Ni	0,481	0,606	0,086	-0,279	0,778	0,479	1,000				
Cr	0,603	0,735	0,371	0,015	0,948	0,581	0,763	1,000			
Fe	0,761	0,763	0,313	-0,047	0,821	0,645	0,652	0,933	1,000		
Mn	0,637	0,340	0,144	0,020	0,736	0,246	0,376	0,680	0,631	1,000	
Cu	-0,261	-0,351	-0,630	-0,122	-0,833	-0,042	-0,720	-0,749	-0,619	-0,312	1,000

Проведенный анализ донных отложений водоемов на территории Югры показал высокую прямую зависимость между несколькими элементами: Zn, Pb, хлориды, Fe и Mn. При этом более четкая прямая связь между Ni и Cr, при слабой взаимосвязи с остальными элементами, привела к их выделению в отдельный кластер (рис. 5, табл. 7).

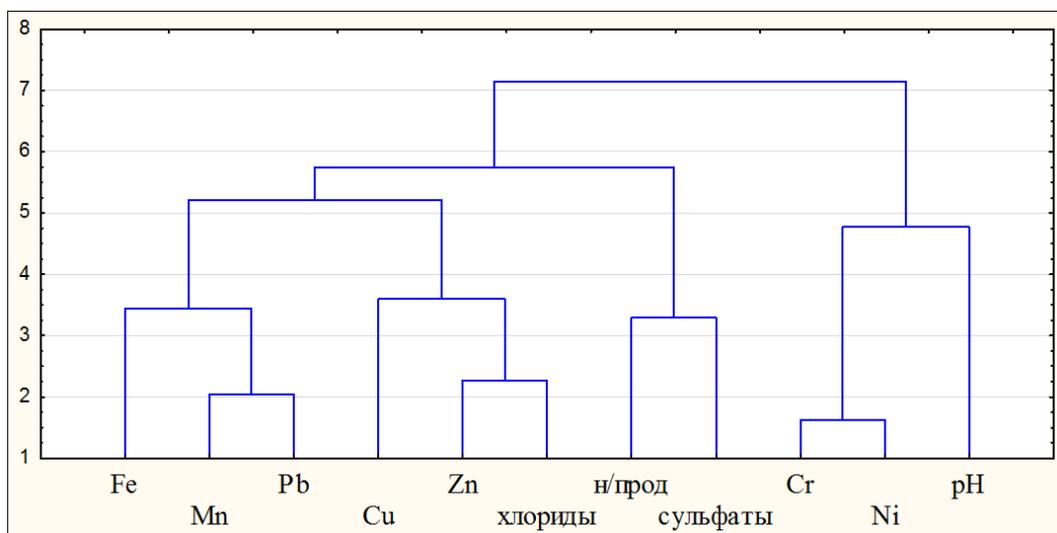


Рис. 5 – Кластерная диаграмма химических элементов донных отложений озер Югры

Таблица 7 – Значения коэффициентов линейной корреляции концентраций химических элементов в донных отложениях озер Югры

Данные	pH	Сульфаты	Хлориды	Нефтепродукты	Pb	Zn	Ni	Cr	Fe	Mn	Cu
pH	1,000										
Сульфаты	-0,713	1,000									
Хлориды	-0,421	0,256	1,000								
Нефтепродукты	-0,583	0,395	0,318	1,000							
Pb	-0,349	0,192	0,751	0,175	1,000						
Zn	-0,502	-0,008	0,714	0,244	0,627	1,000					
Ni	-0,061	-0,360	0,303	-0,065	0,115	0,701	1,000				
Cr	0,279	-0,368	0,217	-0,332	-0,072	0,358	0,853	1,000			
Fe	0,138	-0,011	0,046	-0,433	0,316	0,341	0,403	0,426	1,000		
Mn	0,048	0,140	0,273	-0,165	0,769	0,163	-0,109	-0,101	0,606	1,000	
Cu	-0,076	-0,118	0,470	-0,030	0,287	0,342	-0,031	-0,095	0,238	0,139	1,000

Анализ распределения химических элементов в поверхностных водах рек на территории Югры (рис. 6, табл. 8) показал высокую зависимость между хлоридами и сульфатами, а также между содержанием меди и pH. Разбиение на кластеры в данном случае позволяет лишь выделить несколько групп со слабо коррелированными элементами.

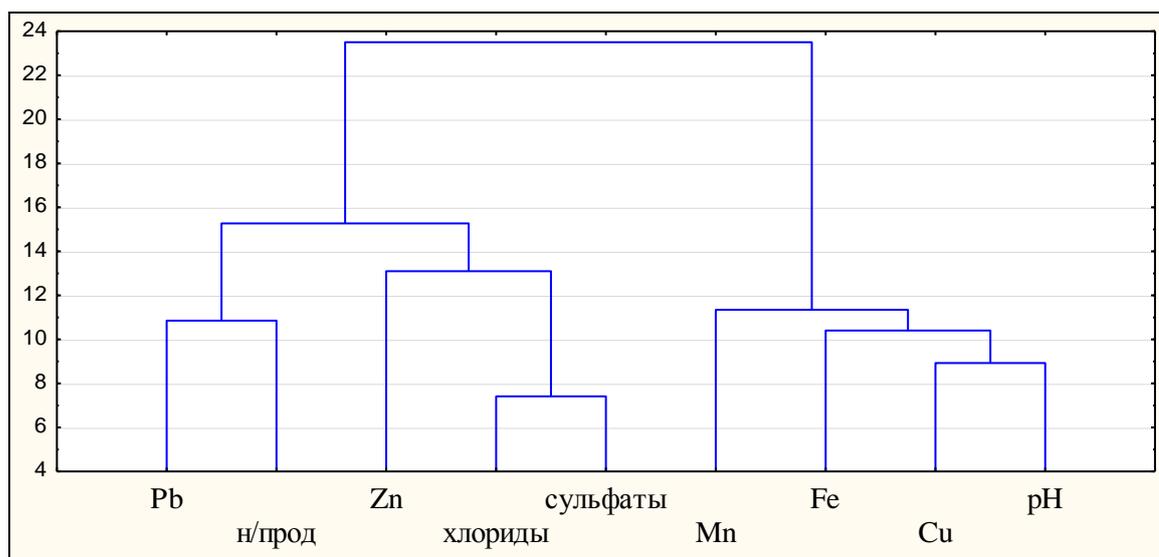


Рис. 6 – Кластерная диаграмма химических элементов в водах рек Югры

Таблица 8 – Значения коэффициентов линейной корреляции концентраций химических элементов в водах рек Югры

Данные	pH	Сульфаты	Хлориды	Нефтепродукты	Pb	Zn	Fe	Mn	Cu
pH	1,000								
Сульфаты	0,052	1,000							
Хлориды	-0,159	0,662	1,000						
Нефтепродукты	0,071	-0,082	0,264	1,000					
Pb	-0,419	0,055	0,368	0,316	1,000				
Zn	0,177	0,181	0,002	-0,145	-0,317	1,000			
Fe	0,358	-0,377	-0,372	-0,174	-0,221	-0,083	1,000		
Mn	0,384	-0,169	-0,214	0,304	-0,228	-0,049	0,166	1,000	
Cu	0,526	-0,186	-0,340	-0,272	-0,389	0,102	0,471	0,425	1,000

Таким образом, статистическая обработка геохимических данных с одновременным применением методов корреляционного и кластерного анализов позволяют выявить и наглядно продемонстрировать прямые и обратные зависимости между рассматриваемыми элементами.

### **Заключение**

Исследования показали, что перераспределение химических элементов в системе вода – донные отложения происходит в основном под действием природных процессов, но некоторые искажения в механизм взаимодействия составных элементов природной среды вносят техногенные факторы, их влияние можно заметить при использовании методов математической статистики.

Изучение химического состава поверхностных вод (рек и озер) показало, что поступление основных химических элементов в водную среду происходит благодаря взаимодействию вод с горными породами. Однако, учитывая, что на механизм этого взаимодействия существенное влияние оказывают характер водообмена, ландшафтные, климатические условия и многие другие факторы, мы имеем очень низкие концентрации большинства анализируемых химических элементов именно в озерах, т.к. основным источником питания водоемов являются слабоминерализованные атмосферные осадки.

Геохимическая обстановка в донных отложениях в целом характеризуется более стабильным состоянием системы [9, С. 40]. В отложениях озер, по сравнению с русловыми осадками, более активно протекают сорбционно-десорбционные процессы, которые в пределах площади исследований специфично затрагивают железо общее, марганец, медь, свинец и никель.

На юге Ямало-Ненецкого автономного округа в пределах исследуемых лицензионных участков, освоение которых идет не более десяти лет, в поверхностных водах и донных отложениях рек методами математической статистики установлены прямые и обратные зависимости между химическими компонентами с высокой корреляционной связью.

Можно отметить, что на территории Ханты-Мансийского автономного округа-Югры, несмотря на большую заболоченность, освоение недр идет более полувека и с каждым годом растет техногенное влияние на условия формирования химического состава поверхностных вод и донных отложений.

Как следствие, проведенные исследования показали, что водотоки и водоемы на территории Югры различаются по характеру геохимической среды, по условиям концентрирования металлов в водотоках и водоемах. Геохимические условия в озерах способствуют более интенсивному переходу анализируемых химических компонентов из водного раствора в твердую форму. При этом зависимость между отдельными химическими элементами и их соединениями еще сохраняется на достаточно хорошем уровне, особенно для водоемов.

Распределение химических элементов в поверхностных водах рек не имеет четко выраженной корреляционной зависимости, что вероятно обусловлено не только гетерогенностью состава вод [13, с.241], но и усиливающимся воздействием на окружающую среду нефтегазового комплекса.

### **Конфликт интересов**

Не указан.

### **Conflict of Interest**

None declared.

### **Список литературы / References**

1. Большаник П.В. Геоэкологические проблемы трансформации рельефа урбанизированных территорий (на примере городов Западной Сибири): монография / П.В. Большаник, В.Н. Недбай. – М.: ИНФРА-М, 2017. – 243 с.
2. Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода-порода: в 5 томах. Т.2: Система вода-порода в условиях зоны гипергенеза / Под ред. Б. Н. Рыженко. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. – 389 с.
3. Ермилов О. М. Воздействие объектов газовой промышленности на северные экосистемы и экологическая стабильность геотехнических комплексов в криолитозоне / О. М. Ермилов, Г. И. Грива, В. И. Москвин. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. – 148 с.
4. Лёзин В. А. Реки Ханты-Мансийского автономного округа. Справочное пособие / В. А. Лёзин. – Тюмень: Вектор Бук, 1999. – 160 с.
5. Лёзин В. А. Озера Среднего Приобья (комплексная характеристика) / В. А. Лёзин, Л. А. Тюлькова – Тюмень: ТюмГУ, 1994. – 278 с.
6. Московченко Д. В. Геохимия ландшафтов севера Западно-Сибирской равнины: структурно-функциональная организация вещества геосистем и проблемы экодиагностики. Автореф.дис... доктор геогр. Наук: 25.00.23: защищена 19.10.10 / Московченко Дмитрий Валерьевич. – С-Пб: С.-Петерб. гос. ун-т, 2010. – 33с.
7. Романова Т. И. Исследование геохимического состояния природных вод на территории месторождения «Каменное». / «Проблемы гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии». Материалы всероссийской научной конференции, посвященной 80-летию кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии / Т. И. Романова, О. В. Шульга. – Томск: Изд-во НТЛ, 2011. – С. 368-374.
8. Романова Т. И. Геохимическое состояние природных вод на территории ХМАО-Югры / Т. И. Романова, Р. Д. Хабибуллина // Наука и мир. – 2016. – №8 (36), Том 2. – С. 96-10.
9. Романова Т. И. Содержание металлов в р.Яныгхулупя на территории ХМАО-Югры / Т. И. Романова, В. А. Самарин // Международный научно-исследовательский журнал. – 2019. – №8 – 1 (86). – С. 35-42.
10. Савичев О. Г. Эколого-геохимическое состояние поверхностных водных объектов в Таз-Енисейском междуречье / О. Г. Савичев, Л. Г. Колесниченко, Е. В. Сайфулина // География и природные ресурсы. – 2011. – №4. – С. 45-49.
11. Справочник по геохимическим поискам полезных ископаемых / Под ред. А. П. Соловов, А. Я. Архипов, В. А. Бугров и др. – М.: Недра, 1990. – 335с.
12. Фёрстер Б. Методы корреляционного и регрессионного анализа / Б. Фёрстер, Б. Рёнц. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 304 с.

13. Шварцев С. Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза / С. Л. Шварцев. – М.: Недра, 1998. – 367 с.

14. Шурова М. В. Химический состав вод торфяно-болотных экосистем Горного Алтая / М. В. Шурова, Л. И. Инишева, Г. В. Ларина, О. А. Орт. // Вестник ТГПУ, 2009. Выпуск 3(81). – С.95-101.

#### Список литературы на английском языке / References in English

1. Bolshanik P. V. Geoekologicheskiye problemy of transformaty reliefa urbanizirovanyh territoriy (na primere gorodov Zapadnoy Sibiri) [Geocological problems of transformation of a relief of the urbanized territories (on the example of the cities of Western Siberia)]: monographic / P. V. Bolshanik, V. N. Nedbay. – M.: INFRA-M, 2017. – 243 p. [in Russian].

2. Geologicheskaya evolutia i samoorganizatsiya sistemy voda-poroda: v 5 ch. Ch.2. Sistema voda-poroda v usloviyah zony gipergineza [Geological evolution and self-organization of the water-rock system: in 5 h. the P. 2. Water-rock system in conditions of hypergenesis zone] / edited by B. N. Ryzhenko. – Novosibirsk: Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 2007. – 389 p. [in Russian].

3. Ermilov O. M. Vozdeystvie obektov gazovoy promyshlennosti na severnye ekosistemy i ekologicheskaya stabilnost geotekhnicheskikh kompleksov v kriolitozone [Impact of gas industry facilities on northern ecosystems and ecological stability of geotechnical complexes in cryolitosone] / O. M. Yermilov, G. I. Griva, et al – Novosibirsk: Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 2002. – 148 p. [in Russian].

4. Lezin V. A. Reki Hanty-Mansiyskogo avtonomnogo okruga. Spravochnoe posobie [Rivers of Khanty-Mansy Autonomous region. Handbook] / V. A. Lezin. – Tyumen: Vector Bouck, 1999. – 160 p. [in Russian].

5. Lesin V. A. Ozera Srednego Priobya (kompleksnaya harakteristika) [Lakes of Middle Ob (complex characteristic)] / V. A. Lesin, L. A. Tulkov– Tyumen: TumSU, 1994. – 278p. [in Russian].

6. Moskovchenko D. V. Geohimia landshaftov severa Zapadno-Sibirskoy ravniny: strukturno-funkcionalnaya organizatsiya vechestva geosistem i problemy ekodiagnostiki [Geochemistry of Landscapes of the North - West Siberian Flat: structural and functional organization of geosystems and ecodiagnosics' problems.] dis... of PhD in Geography: 25.00.23: defense of the thesis 19.10.10 / Moskovchenko Dmitry Valeryevich. – S. – Petersb. State. university, 2010. – 33p. [in Russian].

7. Romanova T. I. Issledovanie geohimicheskogo sostoyaniya prirodnyh vod na territorii mestorozhdeniya "Kamennoe" [Study of the geochemical state of natural waters on the territory of the "Kamennaya" deposit.] // Problemy gidrogeologii, inzhenernoy geologii i gidrogeoekologii. Materialy vsrossiyskoy nauchnoy konferencii, posviachennoy 80-letiyu kafedry gidrogeologii, inzhenernoy geologii i gidrogeoekologii. [Problems of hydrogeology, engineering geology and hydrogeoecology. Materials of the Russian scientific conference dedicated to the 80th Anniversary of the Department of Hydrogeology, Engineering Geology and Hydrogeoecology]/T. I. Romanova, O. V. Shulga. – Tomsk: NTL, 2011. – pp. 368-374. [in Russian].

8. Romanova T. I. Geohimicheskoe sostoyanie prirodnyh vod na territorii HMAO- Yugry [Geochemical state of natural waters on the territory of KhMAO-Ugra] /T. I. Romanova, R. D. Habibullina // Nauka i mir [Science and peace]. – 2016. – № 8 (36), Volume 2. – pp. 96-10. [in Russian].

9. Romanova T. I. Soderzhaniye metallov v r.Yanyghulpya na territorii KHMAO-Yugry [Content of metals in Yanyghulpya river on the territory of the KHMAO-Ugra] / T. I. Romanova, V. A. Samarin // Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal [International research journal]. – 2019. – №8 – 1 (86). – pp. 35-42. [in Russian]

10. Savichev O. G. Ecologo-geohimicheskoe sostoyanie poverhnostnyh vodnyh obektov v Taz-Eniseyskom mezhdurechie [An Ecological-and-geochemical condition of the superficial water objects to Taz-Yeniseisk interfluves area] / O. G. Savichev, L. G. Kolesnichenko, E. V. Saifullina // Geografiaprirodnieresursy [Geography and natural resources]. – 2011. – № 4 – pp. 45-49. [in Russian].

11. Spravochnik po geohimicheskim poiskam poleznyh iskopaemykh [Handbook on geochemical research of minerals]/ edited by A.P.Solov, A.J.Arhipov, V.A. Bugrov et al. – M.: Nedra, 1990. – 335 p. [in Russian].

12. Foerster E. Metody korrelatsionnogo i regressionnogo analizov [Methods of correlation and regression analysis] / E. Foerster, B. Renz. – M.: Finance and statistics, – 1983. – 304 p. [in Russian].

13. Schwartsev S. L. Gidrogeohimiya zony gipergineza [Hydrogeochemistry of hypergenesis zone] / S. L. Schwartsev. – M.: Nedra, 1998. –367 p. [in Russian].

14. Shurova M. V. Himicheskiy sostav vod torfyano-bolotnyh ekosistem Gornogo Altaya [Chemical Composition of Waters of Peat-Swamp Ecosystems of the Altai Mountains] /M. V. Shurov, L. I. Inisheva, G. V. Larina, O. A. Ort // Vestnik TGPU [Journal of TGPU], –2009. – Issue 3 (81). – pp. 95-101. [in Russian].

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.90.12.031>

## ЗОЛОТОЕ ОРУДЕНЕНИЕ В ДОКЕМБРИЙСКИХ МЕТАМОРФИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ ЦЕНТРАЛЬНОГО АЛДАНА

Научная статья

**Шарова Т.В. \***

ORCID: 0000-0003-1413-0239,

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

\* Корреспондирующий автор (kianitt[at]mail.ru)

### Аннотация

Золотое оруденение локализуемое в докембрийских комплексах, известно на большинстве кристаллических щитов Земного шара. В последние годы в результате проведения геологоразведочных работ в центральной части Алданского щита открыт новый генетический тип золоторудной минерализации, в области развития докембрийских метаморфических образований. Данная публикация является продолжением темы исследований золотоносности докембрийских образований Алдано-Станового щита. В настоящей статье излагаются данные о составе и строении пегматоидных золоторудных тел месторождения им. П. Пинигина локализованных исключительно в базитах толеитовой серии.

**Ключевые слова:** золото, Алдано-Становой щит, месторождение П. Пинигина, федоровская свита.

## ORE-GRADE GOLD MINERALIZATION IN PRECEMBRIAN METAMORPHIC COMPLEXES OF CENTRAL ALDAN

Research article

**Sharova T.V. \***

Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

\* Corresponding author (kianitt[at]mail.ru)

### Abstract

Ore-grade gold mineralization localized in Precambrian complexes is known on most of the crystal shields of our planet. The new genetic type of ore-grade gold mineralization has been discovered in the field of development of Precambrian metamorphic formations in recent years, as a result of exploration in the central part of the Aldan shield. This paper is a continuation of the studies of the gold content of Precambrian formations of the Aldan-Stan shield. This paper presents data on the composition and structure of the pegmatoid gold ore bodies of the deposit named after P. Pinigin localized exclusively in the bases of the tholeiitic series.

**Keywords:** gold, Aldan-Stan shield, deposit named after P. Pinigin, Fedorov series.

Одним из богатейших минеральными ресурсами районов Южной Якутии, в пределах которого расположены месторождения графита, апатита, железа, серебра, меди, золота, цинка, и множества других полезных ископаемых является Центральное-Алданский рудный район. Но для экономики республики наиболее важное значение имеют золоторудные месторождения. На сегодняшний день в Центральном Алдане практическое значение имеют месторождения четырёх геолого-промышленных типов генетически связанных с мезозойским этапом тектономагматической активизации: лебединский, куранахский, эльконский и рябиновский.

На месторождении лебединского типа рудные тела локализованы в нижней части венд-кембрийской преимущественно доломитовой толщи, прорванной субщелочными породами мезозойского возраста, и представлены крутопадающими жилами или сближенными в пространстве прожилками, горизонтальными метасоматическими залежами, участками прожилково-вкрапленного оруденения [1].

Месторождения Куранахского типа представлены золоторудными телами малосульфидных, вкрапленных руд, образовавшихся на контакте известняков нижнего кембрия с юрскими песчаниками и локализованными в пределах протяженных (до нескольких километров), неглубоких (до 75 м) карстовых полостей [2], [3].

Рудные тела месторождений эльконского типа размещены в раннеархейских породах, представляют собой сульфидизированные калишпат-карбонатные метасоматиты, приуроченные к мощным и протяженным крутопадающим долгоживущим зонам дробления, катаклаза и милонитизации [4].

Рябиновское месторождение относится к золотопорфировому типу оруденения в калиевых щелочных вулканоплутонических комплексах. Золоторудные тела представлены наклонными и крутопадающими штокверковыми зонами в микроклинизированных и серицитизированных щелочных сиенитах [5].

В ходе проведения поисковых работ на рудное золото на площади Верхне-Любкакайского рудного поля в 2000-х годах появилась возможность открытия нового генетического и промышленного золотого оруденения докембрийского возраста на Алданском щите.

Золоторудное месторождение им. П. Пинигина расположено в центральной части Алдано-Станового щита вблизи границы Амгинской коллизионной зоны с Нимнырским гранулит-ортогнейсовым террейном среди пород нимнырской свиты, в районе ее тектонического контакта с породами федоровской свиты (рис. 1), которая сложена метавулканитами с изотопным возрастом  $2006 \pm 3$  млн. лет [6]. Золоторудные тела локализованы в базитах, относящихся к медведевскому комплексу с изотопным возрастом около 1,9 млрд. лет [7].

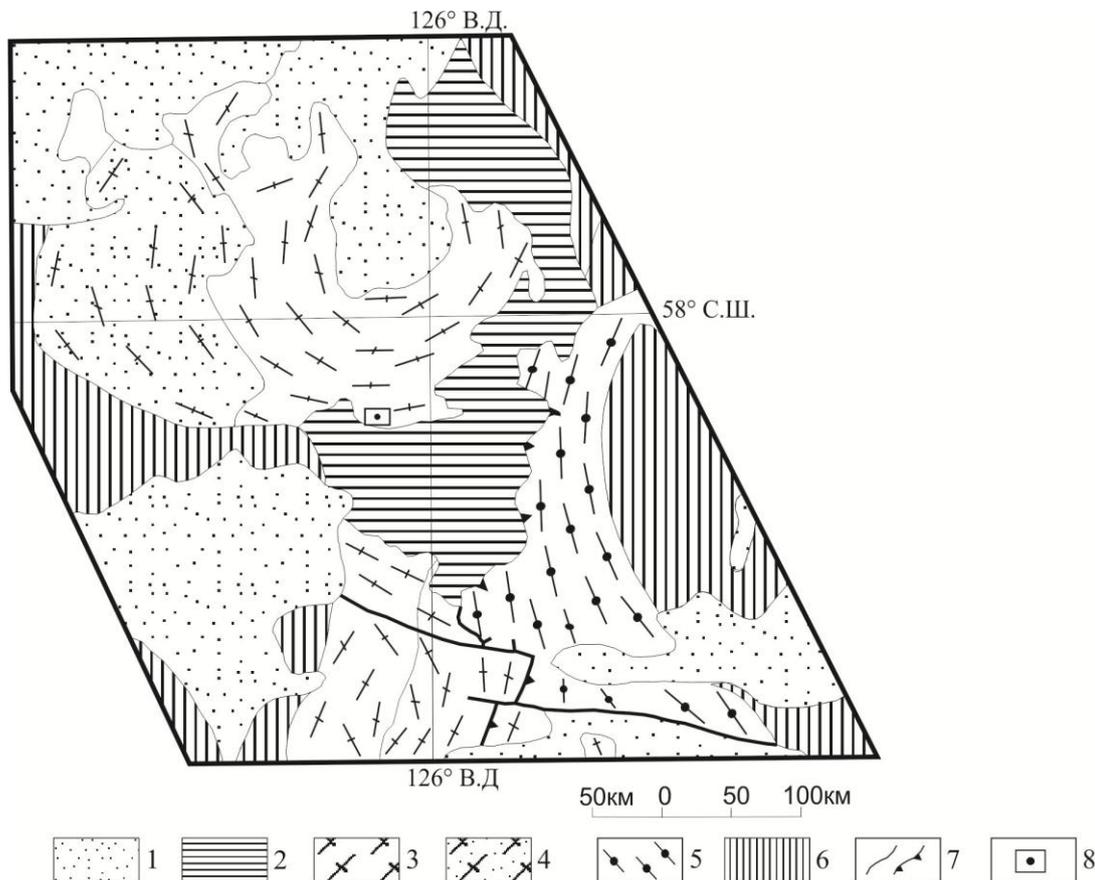


Рис. 1 – Схематическая геологическая карта Центрального-Алданского супертеррейна [8]

1 – осадочные породы венда, нижнего кембрия, юры и нижнего мела, архей и нижний протерозой; 2 – федоровская свита, амфиболовые, диопсид-амфиболовые, двупироксен-амфиболовые гнейсы, плагиогнейсы и кристаллические сланцы, линзы кальцифиров, диопсид-флогопитовых и диопсид-магнетитовых пород и руд; 3 – нимырская свита гранито-гнейсы, чарнокитовые и эндербитовые гнейсы, линзы двупироксеновых кристаллических сланцев; 4 – курумканская свита, кварциты и высокоглиноземистые гнейсы, линзы кальцифиров, гранито-гнейсы; 5 – сеймская толща, гранат-биотитовые гнейсы и плагиогнейсы, двупироксеновые и диопсид-амфиболовые плагиогнейсы; 6 – зоны тектонического меланжа; 7 – границы террейнов и зон тектонического меланжа, надвиги; 8 – Верхне-Любкайское рудное поле

Рудовмещающая толща на месторождении представляет собой моноклинально залегающий пакет чередующихся, согласных, субпараллельных, крутопадающих, пластообразных, тел базитов и субщелочных биотитовых гранитов, согласных с вмещающими биотит-гиперстеновыми, графит-гранат-биотитовыми и графит-гранат-кордиерит-биотитовыми гнейсами и плагиогнейсами [9].

Среди вмещающих пород преобладают среднезернистые, полосчатые биотит-гиперстеновые гнейсы и плагиогнейсы, состоящие из калишпат-пертита – 5-55%, антипертитового олигоклаза – 10-70%, кварца – 20-40%, биотита – 2-15% и гиперстена – 3-12%. Гранат- и кордиеритсодержащие разности встречаются среди биотит-гиперстеновых гнейсов в подчиненном количестве. Грубополосчатые, такситового облика породы, сложенные калишпат-пертитом – 10-50%, антипертитового олигоклаза – 10-40%, алмандином – 5-20%, кордиеритом – 0-15%, кварцем – 15-25%, гиперстеном – 0-2%, биотитом 5-8%, графитом – 2-5%. Акцессорные и рудные минералы в гнейсах представлены зернами циркона, апатита, ильменита.

Линейные тела субщелочных гранитов согласны с залеганием вмещающих гнейсов. Внешне граниты представляют собой неравномернозернистые, массивные и гнейсовидные породы розовато- и кирпично-красного цвета с серым и тесно-серым кварцем в составе. Граниты состоят из калишпат-пертита – 60-70%, антипертитового альбит-олигоклаза – 5-15%, кварца – 25-35%, биотита – 1-5%. Акцессорные и рудные минералы – циркон, апатит, сфена, магнетит. Изотопный возраст субщелочных гранитов 1,9 – 1,92 млрд. лет [8].

Золоторудная минерализация локализована в базитах, слагающих пластообразные и линзовидные тела, согласные с залеганием вмещающих гнейсов. Протяженность тел достигает 7,5 км и более, мощность колеблется от 25 до 150 м. Это темно-серые, местами до черных среднезернистые, равномернозернистые, массивные, меланократовые породы, состоящие из ортопироксена – 0-40%, клинопироксена – 0-40%, амфибола – 0-25%, андезина – 45-60%, примеси биотита. В базитах присутствует вкрапленность магнетита, ильменита и титаномагнетита, содержание которых не превышает 2-5%. Среди акцессорных минералов преобладает апатит сфен и циркон. Средний размер зерен 0,3-0,5 мм. Микроструктура пород гипидиоморфнозернистая, схема кристаллизации порообразующих минералов боуэновская [10].

Несмотря на воздействие на базиты гранулитового метаморфизма, в них сохранились структурные признаки первично-магматического происхождения, что позволяет отнести базиты к ортопородам.

По химическому составу основные породы месторождения относятся к толеитовой серии. Каждое из тел базитов медведевского комплекса представляет собой чередование разностей горизонтов норитов, габбро-норитов, габбро, габбро-диоритов и плагиогранитов мощностью 0,2-3,0 м, согласных с залеганием тел. Вероятно, это свидетельствует о расслоенности интрузивов основного состава. В целом среди основных пород преобладают габбро-нориты.

В юго-восточной и центральной части месторождения значительные объемы тел базитов сложены апобазитовыми метасоматитами, состав которых близок к составу скарноподобных пород железорудных месторождений Южно-Алданской провинции. Основные породообразующие минералы метасоматитов; салит, олигоклаз, скаполит, тремолит и эпидот, второстепенные – кварц, андрадит, калишпат-пертит, карбонат. Отличительной особенностью этих пород является обязательное присутствие в них крупных зерен сфена.

Промышленные золоторудные залежи локализованы в пластообразных телах базитов среди разностей, содержащих ромбический пироксен – норитов, габбро-норитов, амфиболовых габбро-норитов, вмещаемых высокоглиноземистых графит-гранат-биотитовыми и графит-геранат-кордиерит-биотитовыми гнейсами.

На месторождении выявлено 6 рудных тел с промышленными содержаниями и запасами золота. Тела имеют пластообразную форму и залегание согласное с вмещающими базитами. Их длина по простиранию изменяется от 140 до 1000, по падению – от 30 до 350 м. С глубиной мощность рудных тел уменьшается.

Рудные тела сложены крупнокристаллическими, линзовидными обособлениями сульфидно-пироксенового, сульфидно-пироксен-плагиоклазового, сульфидно-пироксен-плагиоклаз-кварцевого состава согласными с залеганием вмещающих пород. Мощность обособлений колеблется от 3-4 см до 0,5-0,8 м, в единичных случаях она достигает 4,5 м. Мощность рудного тела зависит от количества и мощности сближенных линз в рудопересечениях, которые разделяются практически незолотоносными вмещающими породами [10].

Рудные обособления небольшой мощности 3-8 см не являются зональными и сложены либо амфиболом, клино- и ортопироксеном, либо плагиоклазом с подчиненным количеством амфибола, ромбического и моноклинного пироксенов. Участки мощностью 15-20 см состоят из двух зон – внешней зоны до 5-7 см существенно пироксенового или амфибол-пироксенового состава и внутренней (центральной), сложенной олигоклаз-андезином с подчиненным количеством пироксена и кварца. В обособлениях мощностью более 20 см выделяется третья зона существенно кварцевого состава с подчиненным количеством амфибола, пироксенов и олигоклаз-андезина. Параметры внешней (пироксеновой) и промежуточной (существенно плагиоклазовой) зон выдержаны, и в отличие от центральной кварцевой, зоны не зависят от мощности обособлений.

Контакты обособлений согласны с залеганием вмещающих базитов и приспособлены к ограничениям породообразующих минералов вмещающей породы. В экзоконтактах обособлений породообразующие минералы, в особенности плагиоклаз и амфибол, увеличиваются в размерах до 1,5-2 мм.

От вмещающей породы обособления отличаются крупнокристаллическим строением и ярко выраженным идиоморфизмом пироксенов, плагиоклаза и амфибола. В обособлениях больше 20 см, внешняя зона, контактирующая с вмещающей породой, сложена призматическими зернами пироксенов, среди которых встречаются зерна олигоклаз-андезина. Следующая зона, мощностью до 10 см сложена призматическими кристаллами олигоклаз-андезина, среди которых в подчиненном количестве встречаются идиоморфные зерна клино- и ортопироксенов. Мощность центральной зоны зависит от мощности обособлений и колеблется от первых сантиметров до 4,0 м [10]. Она сложена зернами кварца неправильной формы размером до 2,0 см и более, в котором рассеяны такого же размера кристаллы плагиоклаза, ромбического и моноклинного пироксенов, керсутита.

Главные рудные минералы в обособлениях представлены пирротинном, пиритом, леллингитом, арсенопиритом, магнетитом содержание которых колеблется от 2-3% до 50-60%. К второстепенным минералам, содержание которых менее 1% относятся халькопирит, молибденит, кобальтин, золото. Рудные минералы выполняют интерстиции породообразующих силикатов и кварца. Наибольшее их содержание наблюдается в краевой и промежуточной зонах, а также в кварцевых ядрах небольшой мощности. При содержании до 7-15%, рудная минерализация вкрапленная и прожилково-вкрапленная. При их содержании выше 18-25% структура руд сидеронитовая.

Избыточное содержание серы и мышьяка, в сравнении теоретическим характерно для пирротина, леллингита и арсенопирита из руд с максимальным содержанием золота. Самородное золото встречено в центральных зонах обособлений, где оно приурочено к микротрещинам в кварце и к интерстициям минералов. Иногда золото образует мелкие гнезда в кварце. Средний размер золотин 10 микрон. Средняя пробность золота 990%. Примесями в золоте являются серебро – до 0,9%, медь – до 0,08%, ртуть – до 0,03%.

### **Заключение**

Таким образом, для выяснения генетических особенностей золотого оруденения в докембрийских метаморфических комплексах и критериев контроля его размещения определяющую роль играют следующие факторы:

Пространственная связь золотого оруденения с расслоенными базитами медведевского комплекса, расположенными на контакте нимырской и федоровской свиты;

Концентрация золота в телах базитов, вмещаемых высокоглиноземистыми гнейсами при обязательном присутствии в составе основных пород ортопироксена;

Пластообразная форма тел, сложенных рудовмещающими базитами и согласно залегание их с вмещающими гнейсами;

Линзовидная форма золотоносных обособлений и согласное залегание обособлений и рудных тел;

Приспособление контактов золотоносных обособлений к ограничениям породообразующих минералов базитов;

Наличие в телах базитов медведевского комплекса зональных крупнокристаллических обособлений пироксенового, пироксен-плагиоклазового и пироксен-плагиоклаз-кварцевого состава, содержащих арсениды и сульфоарсениды железа;

Зональное строение и крупнокристаллическое сложение золотоносных обособлений, ярко выраженный идиоморфизм породообразующих минералов в них;

Отсутствие околорудных изменений и первичных ореолов рассеяния золота вокруг обособлений и рудных тел;

Сидеронитовая структура богатых сульфидами руд.

Приведенные факты являются свидетельством генетической связи золотого оруденения с раннепротерозойскими расслоенными базитами медведевского комплекса, относящимися к толеитовой серии. Рудные обособления, вероятно, сформированы в процессе дифференциации магмы основного состава из остаточных расплавов, обогащенных серой, рудными элементами и кремнеземом. Генезис руд позднемагматический, возможно, пегматитовый. Кристаллизация остаточного расплава завершается внутрикамерными гидротермально-метасоматическими процессами: вторичными изменениями минералов и кристаллизацией леллингита, кобальтина, арсенопирита.

#### Конфликт интересов

Не указан.

#### Conflict of Interest

None declared.

#### Список литературы / References

1. Добровольская М.Г. Золоторудное месторождение Лебедино (Центральный Алдан): минеральные парагенезисы, стадии и условия образования / М.Г. Добровольская, М.В. Разин, В.Ю. Прокофьев // Геология рудных месторождений. – 2016. – Т. 58. – № 4. – С. 346-366.
2. Дворник Г.П. Распределение содержаний золота в рудных телах Центрального месторождения в Куранахском поле (Алданский щит) / Г.П. Дворник // Вестник Уральского отделения Российского минералогического общества. – 2011. – №8. – С. 29-34.
3. Бойцов В.Е. Металлогеническое районирование Центрально-Алданского рудного района республики Саха (Якутия) / В.Е. Бойцов, А.А. Верчеба, Т.Н. Пилипенко, А.В. Жданов // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2010. – № 5. – С. 23-32.
4. Кочетков А.Я. Мезозойские золотоносные рудно-магматические системы Центрального Алдана / А.Я. Кочетков // Геология и геофизика. – 2006. – Т. 47. – № 7. – С. 850-864.
5. Дворник Г.П. Распределение содержаний золота и серебра в рудных телах Рябинового и Нового месторождений (Алданский щит) / Г.П. Дворник // Литосфера. – 2011. – № 4. – С. 119-130.
6. Великославинский С.Д. Первичная природа, возраст и геодинамическая обстановка формирования протолитов метаморфических пород федоровской толщи (Алданский щит) / С.Д. Великославинский, А.Б. Котов, Е.Б. Сальникова, и др. // Петрология. – 2006. – Т. 14. – №1. – С. 25-43.
7. Смелов А.П. Первые данные о синколлизонных базитах и ультрабазитах палеопротерозоя Алдано-Станового щита / А.П. Смелов, В.И. Березкин, Н.В. Попов и др. // Геология и геофизика. – 2006. – Т. 47. – №1. С. 153-165.
8. Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия). – М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. – 571 с.
9. Шарова Т.В. Вещественный состав и особенности генезиса золотого оруденения в докембрийских метаморфитах Алданского щита / Т.В. Шарова // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. – 2006. – № 4 (136). – С. 102-103.
10. Шарова Т.В. Геолого-структурные особенности и термобарогеохимические условия образования золоторудного месторождения им. Пинигина (Центральный Алдан): автореферат дис. ... канд. геол.-мин. наук / Юж. федер. ун-т. Ростов-на-Дону, 2008.

#### Список литературы на английском языке / References in English

1. Dobrovolskaja M.G. Zolotorudnoe mestorozhdenie Lebedinoe (Central'nyj Aldan): mineral'nye paragenezisy, stadii i uslovija obrazovaniya [Lebediny gold deposit, Central Aldan: mineral parageneses, stages, and formation conditions] / M.G. Dobrovolskaja, M.V. Razin, V.Yu. Prokof'ev // Geologija rudnyh mestorozhdenij [Geology of Ore Deposits]. – 2016. – V. 58. – № 4. – P. 346-366. [in Russian]
2. Dvornik G.P. Raspredelenie soderzhanij zolota v rudnyh telah Central'nogo mestorozhdenija v Kuranahskom pole (Aldanskij shhit) [Distribution of gold content in the ore bodies of the Central Deposit in the Kuranakh field (Aldan shield)] / G.P. Dvornik // Vestnik Ural'skogo otdelenija Rossijskogo mineralogicheskogo obshhestva [Bulletin of the Ural branch of the Russian mineralogical society]. – 2011. – №8. – P. 29-34. [in Russian]
3. Bojcov V.E. Metallogenicheskoe rajonirovanie Central'no-Aldanskogo rudnogo rajona respubliki Saha (Jakutija) [Metallogenic zoning of Central Aldan ore region of Sakha Republic (Yakutia)] / V.E. Bojcov, A.A. Vercheba, T.N. Pilipenko et al // Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Geologija i razvedka [Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenij]. – 2010. – №5. – P. 23-32. [in Russian]
4. Kochetkov A.Ya. Mezozojskie zolotonosnye pudno-magmaticheckie sistemy Central'nogo Aldana [Mesozoic gold-bearing ore-magmatic systems of Central Aldan] / A.Ya. Kochetkov // Geologija i geofizika [Russian geology and geophysics]. – 2006. – V. 47. – № 7. – P. 850-864. [in Russian]
5. Dvornik G.P. Raspredelenie soderzhanij zolota i srebra v rudnyh telah Rjabinovogo i Novogo mestorozhdenij (Aldanskij shhit) [The distribution of the contents of gold and silver in the ore bodies of Ryabinovoe and the New field (Aldan shield)] / G.P. Dvornik // Litosfera [Lithosphere]. – 2011. – № 4. – P. 119-130. [in Russian]
6. Velikoslavenskij S.D. Pervichnaja priroda, vozrast i geodinamicheskaja obstanovka formirovanija protolitov metamorficheskikh porod fedorovskoj tolshhi (Aldanskij shhit) [Primary nature, age and geodynamic conditions of formation of metamorphic rocks protolites of the Fedorov strata (Aldan shield)] / S.D. Velikoslavenskij, A.B. Kotov, E.B. Sal'nikova et al // Petrologiji [Petrology]. – 2006. – V.14. – №1. P. 25-43. [in Russian]
7. Smelov A.P. Pervye dannye o cinkollizionnyx bazitax i ul'tpabazitax paleoprotepozjoja Aldano-Stanovogo shhita [First data on the Paleoproterozoic syncollisional basites and ultrabasites of the Aldan-Stanovoy shield] / A.P. Smelov, V.I.

Bepezkin, N.V. Popov et al // Geologija i geofizika [Russian geology and geophysics]. – 2006. – V. 47. – №1. P. 153-165. [in Russian]

8. Tektonika, geodinamika i metallogenija territorii Respubliki Saha (Jakutija) [Tectonics, geodynamics and metallogeny of the Republic of Sakha (Yakutia)]. – M.: MAIK «Nauka/Interperiodika», 2001. – 571 p. [in Russian]

9. Sharova T.V. Veshhestvennyj sostav i osobennosti genezisa zolotogo orudnenija v dokembrijskih metamorfiteh Aldanskogo shhita [Material composition and features of the Genesis of gold mineralization in Precambrian metamorphites of the Aldan shield] / T.V. Sharova // Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Severo-Kavkazskij region. Serija: Estestvennye nauki [News of higher educational institutions. North Caucasus region. Series: Natural Sciences]. – 2006. – № 4 (136). – P. 102-103. [in Russian]

10. Sharova T.V. Geologo-strukturnye osobennosti i termobarogeohimicheskie uslovija obrazovanija zolotorudnogo mestorozhdenija im. Pinigina (Central'nyj Aldan) [Geological and structural features and thermobarogeochemical conditions of formation of the gold Deposit. Pinigina (Central Aldan)]: autoabstract dis...of PhD in Geology and Mineralogy/ Yuzh. feder. un-t. Rostov-na-Donu, 2008. [in Russian]

**ФУНКЦИИ ПОСТПИРОГЕННОГО УГЛЯ В ПОЧВАХ БОРЕАЛЬНЫХ ЛЕСОВ ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА**

Научная статья

**Брянин С.В.<sup>1</sup> \* Кондратова А.В.<sup>2</sup>**<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-2227-5254;<sup>1,2</sup> Институт геологии и природопользования ДВО РАН, Благовещенск, Россия

\* Корреспондирующий автор (bruanin[at]gmail.com)

**Аннотация**

Бореальные леса выступают самым значительным стоком углерода среди экосистем суши. Лесные пожары ежегодно происходят на миллионах гектаров бореальной зоны. Потери ранее закреплённого лесами углерода в форме углекислого газа при горении измеряются миллионами тонн, а образование постпирогенного угля – гигатоннами. Как наиболее инертный и долговременный продукт горения уголь привлекает внимание учёных с середины 20 века, однако до сих пор его экосистемная функция до конца не выяснена. Целью работы было установить влияние угля на свойства почв, возобновление растительности и разложение органического вещества в бореальных лесах Дальнего Востока. Исследования проведены в северной части Амурской области в лиственных лесах предгорий хребта Тукурингра. Установлена положительная корреляция между содержанием угля в почве и кислотностью почв ( $p_{H_2O}$ )  $p < 0.05$ , влажностью почвы и содержанием подвижного фосфора. Уголь положительно влияет на возобновление сосны. Содержание угля в почвах после пожара не имело связи с содержанием аммонийных форм азота ( $NH_4^+$ ) и количеством проростков лиственницы ( $p = 0,664$  и  $0,5135$ ). Уголь ускоряет поздние стадии разложения тонких корней лиственницы. Фоновая концентрация угля не оказывала влияния на разложение корней, при этом двойная средняя и максимальная концентрации имели сходный эффект ускорения разложения. Результаты исследований показывают, что в условиях постпирогенных лесов Дальнего Востока России уголь выполняет значимую экосистемную функцию ускоряя процессы накопления устойчивых форм углерода в почвах и возобновление хвойных первичных лесов.

**Ключевые слова:** постпирогенный уголь, бореальные леса, почвы, биодеструкция.

**FUNCTIONS OF POSTPYROGENOUS COAL IN SOILS OF BORAL FORESTS OF FAR EAST**

Research article

**Bryanin S.V.<sup>1</sup> \* Kondratova A.V.<sup>2</sup>**<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-2227-5254;<sup>1,2</sup> Institute of Geology and Nature Management, FEB RAS, Blagoveshchensk, Russia

\* Corresponding author (bruanin[at]gmail.com)

**Abstract**

Boreal forests are the most significant carbon sink among ground ecosystems. Forest fires occur annually on millions of hectares of the boreal zone. Millions of tons of carbon fixed previously by forests are lost in the form of carbon dioxide during combustion, as well as gigatons of post-pyrogenic coal. Being the most inert and long-term combustion product, coal has been attracting the attention of scientists since the mid-20th century, but its ecosystem function has not yet been fully understood. The goal of the study is to establish the effect of coal on soil properties, renewal of vegetation, and decomposition of organic matter in the boreal forests of the Far East. The studies were conducted in the northern part of the Amur Region in the larch forests of the foothills of the Tukuringra ridge. A positive correlation was established between the coal content in the soil and soil acidity ( $p_{H_2O}$ )  $p < 0.05$ , soil moisture, and mobile phosphorus content. Coal has a positive effect on pine regeneration. The coal content in the soil after the fire had no correlation with the content of ammonium forms of nitrogen ( $NH_4^+$ ) and the number of larch seedlings ( $p = 0.664$  and  $0.5135$ ). Coal accelerates the late stages of decomposition of thin larch roots. The background concentration of coal did not affect the decomposition of the roots, while the double average and maximum concentrations had a similar effect of accelerating decomposition. The research results show that under the conditions of postpyrogenic forests of the Russian Far East, coal performs a significant ecosystem function by accelerating the accumulation of stable forms of carbon in soils and the renewal of coniferous primary forests.

**Keywords:** postpyrogenic coal, boreal forests, soils, biodegradation.

**Введение**

Почвы бореальных лесов считаются основным резервуаром углерода среди экосистем суши, играющим важную роль в регуляции концентрации парниковых газов в атмосфере [1]. Лесные пожары - основной вид нарушений бореальных экосистем, однако, несмотря на большое внимание к этому вопросу, наши знания о последствиях этих нарушений весьма поверхностные. Главным продуктом горения является постпирогенный уголь, который сохраняется в почвах до 11000 лет после пожара [2]. Ежегодно 256 млн. тонн растительной биомассы на Земле превращается в постпирогенный уголь в результате пожаров [3]. С одной стороны, постпирогенный уголь сам по себе является долговременным малодинамичным пулом углерода [2], с другой, находясь в непосредственном контакте с почвой, микробиотой и растительными остатками уголь активно участвует в процессах биодеструкции, приводя к потерям органического вещества в почвах бореальных лесов [4]. Таким образом постпирогенный уголь составляет значительный пул углерода в бореальных лесах, а его роль и круговорот до конца не выяснены [5].

Постпирогенный уголь существенно изменяет свойства почв благодаря его физическим и химическим свойствам.

Благодаря высокой пористости крупных фрагментов и высокой дисперсности мелких частиц постпирогенный уголь способен поглощать и удерживать значительные количества питательных веществ и влаги. Такие свойства угля способствуют повышению ёмкости катионного обмена почв и изменению кислотности. Влажность почв так же напрямую связана с содержанием постпирогенного угля: в почвах с высокими содержаниями угля отмечается достоверное увеличение влажности в засушливые периоды [6].

Важной функцией лесной экосистемы является способность к биодеструкции органического вещества, посредством которой углерод закрепляется в почвах [7]. Находясь в поверхностном слое почв уголь участвует в приросте корневых систем и разложении отмерших корневых остатков. Например, установлено, что уголь способствует развитию корневых систем сеянцев лиственницы Гмелина [8] и многих других бореальных видов [9], а также оказывает положительное влияние на жизнеспособность тонких корней взрослых деревьев [10]. Тонкие корни являются не только важным органом растений, но и выполняют основную роль в пополнении устойчивого органического вещества в почвах [11]. Поэтому важно понимать роль постпирогенного угля в процессах накопления устойчивого органического вещества в почвах.

Целью данной работы было оценить запасы постпирогенного угля и его связь с почвенными свойствами, а также влияние постпирогенного угля на скорость биодеструкции тонких корней лиственницы Гмелина (*Larix Gmelinii* Rupr.), как основной лесообразующей породы бореальных лесов Евразии.

### Методы и принципы исследования

Исследования проведены в бореальных лесах Амуро-Зейского междуречья в предгорьях хребта Тукурингра (Верхнее Приамурье). Согласно современному почвенно-географическому районированию России, исследуемая территория входит в Восточную бурозёмно-лесную область. Зональным почвообразовательным процессом здесь является буроземообразование, а преобладающими почвами, соответственно, бурозёмы. Леса покрывающие исследуемую территорию представлены лиственничниками с березой, сосной и осиной. Различные вариации состава лесов обусловлены стадиями постпирогенных сукцессий.

При регулярных низовых пожарах нарушаются, прежде всего, поверхностные горизонты почв, поэтому особое внимание в наших исследованиях было уделено верхнему десятисантиметровому слою. Образцы буротаёжных почв (слой 0-10 см) были отобраны в 100 кратной повторности цилиндром. В них определено содержание подвижных форм основных питательных элементов по общепринятым методам в почвоведении и агрохимии. На каждой площадке отбора образцов произведен учёт возобновления древесной растительности. Содержание постпирогенного угля в поверхностных горизонтах почв определено модифицированным методом «СТО375» [12]. Методика заключается в потере веса пробы от последовательных экспозиций в муфельной печи при различных температурах.

Исследование влияния постпирогенного угля на разложение проведено в лиственничнике на территории Зейского государственного природного заповедника на южном склоне хребта Тукурингра. При подготовке эксперимента мы предварительно измерили концентрации угля в почвах изучаемого и окружающих лесов. Уголь для эксперимента был изготовлен в лабораторных условиях в муфельной печи при ограниченном доступе кислорода при температуре 450°C в течение 45 минут. Экспериментально установлено, что данные температурно-временные условия характерны для образования угля при низовых пожарах [13]. Полученный уголь был измельчён и просеян для получения однородных частиц размером 0,5–2,0 мм. Приблизительно 1 г тонких (0,5-2 мм) корней, свободных от почвы, высушенных при температуре 40°C до постоянного веса были тщательно перемешаны и помещены в нейлоновые мешочки размером (10 × 10 см; размер ячейки: 45 мкм). Контрольный вариант эксперимента представлял собой вариант без добавления угля. Варианты эксперимента: «Фон» - 1г корней + количество угля, соответствующее среднему значению из предварительно измеренных концентраций в почвах (0,95 г/кг почвы); «Двойная» - к корням добавляли количество угля, соответствующее двукратной фоновой концентрации (1,9 г/кг почвы); «Максимальная» количество угля, добавленное к корням эквивалентно максимальной концентрации (3,9 г/кг почвы), измеренной в почвах постпирогенных лесов.

Эксперимент начат в мае 2015 года, промежуточные отборы образцов производились на 70, 150, 365 и 515 день от начала эксперимента. Каждый отбор включал в себя 5 образцов для каждого варианта с углём и 5 контрольных образцов. Мешочки с материалом помещались в узкий разрез сделанный в почве под углом 45 градусов до глубины 10 см, почва над мешочками слегка уплотнялась для лучшего контакта с материалом. После отбора образцы высушивались и взвешивались для определения массы и потери веса по сравнению с исходным. На первом этапе обработки данные проверяли на нормальность с использованием теста Шапиро-Уилка. Разница между вариантами оценивалась при помощи попарного сравнения (тест Вальда) на основе обобщённой линейной смешанной модели (GLMM) где «время» устанавливалось как случайный фактор. Статистическая обработка данных проведена в среде R версия 3.3.1 [14].

### Основные результаты

Содержание угля в изученных почвах варьирует в пределах от 0 до 25 мг/кг почвы, что, согласно глобальным оценкам, является высоким содержанием [15] (см. таблицу 1). Почвенная кислотность заметно выше фоновых значений для исследуемой зоны (pHводн. 4,5-5,1).

Таблица 1 – Содержание постпирогенного угля и основные свойства почв в слое 0-10 см

Характеристика	Мин.	Медиа на	Средне е	Макс.	SD	V, %
Уголь (мг кг <sup>-1</sup> )	0.0	8.0	8.3	25.4	4.5	24.1
Аммонийный азот NH <sub>4</sub> -N (мг кг <sup>-1</sup> )	0.5	5.3	6.4	21.3	3.5	55.5
Доступный фосфор (мг кг <sup>-1</sup> )	7.8	25.0	29.6	93.4	17.7	59.6
pH водн.	5.6	6.4	6.3	7.1	0.4	5.7
Влажность почв (%)	15.6	30.9	33.7	71.6	11.4	33.8
Лиственница сеянцы (шт*площадку)	0.0	1.0	1.3	5.0	1.1	90.7
Сосна сеянцы (шт*площадку)	0.0	1.0	1.5	6.0	1.4	97.6

Установлена значительная положительная корреляция между содержанием угля в почве и реакцией среды (pH), влажностью почвы и содержанием подвижного фосфора (рис. 1). Кроме того, обнаружена положительная зависимость между содержанием угля и количеством проростков сосны, которые возобновляются на месте пожара. Так же необходимо отметить, что содержание угля в почвах после пожара не влияет на количество аммонийных форм азота (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) и количество проростков лиственницы (рис. 1  $r=0,664$  и  $0,5135$  соответственно).

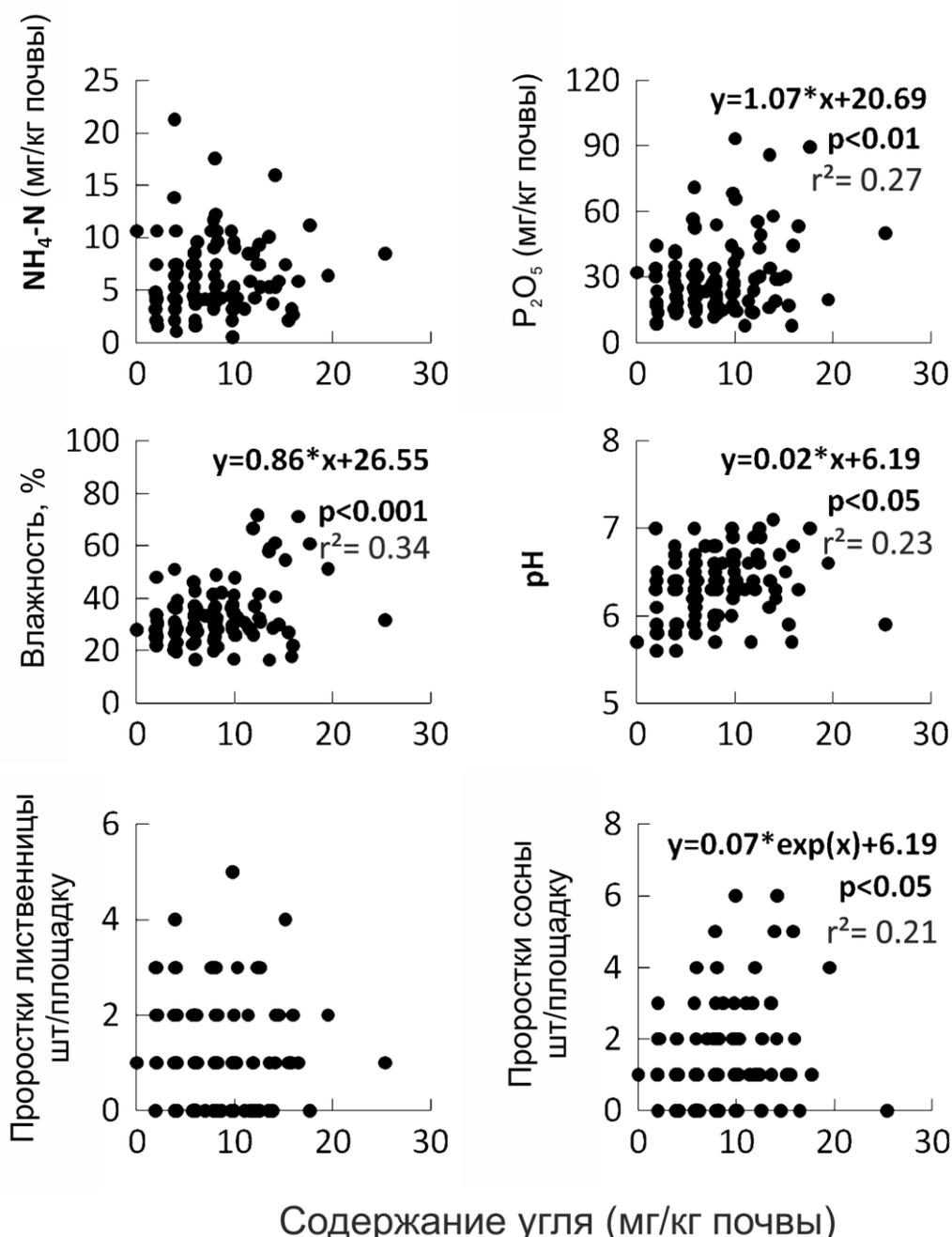


Рис 1 – Зависимость между содержанием угля, свойствами поверхностного слоя почв и количеством проростков хвойных пород-лесообразователей

Примечание: проростки сосны и лиственницы подсчитывались на площади 50 см<sup>2</sup>. В статистическом анализе использована общая линейная регрессионная модель, уровень значимости был установлен для 95% случаев

Нами получены первые полевые доказательства позитивной взаимосвязи между содержанием угля, количеством проростков сосны и некоторыми химическими свойствами почв. Положительная связь рН с количеством угля в почвах объясняется окислением органического вещества в почве и на её поверхности, что, наряду с углём, приводит к образованию щелочных оксидов. Позитивная связь угля и влажности почв вероятнее всего обусловлена обилием пор в структуре угля, и его способностью удерживать воду. Уголь способен сохранять пористость длительное время, а, следовательно, удерживать большое количество влаги на единицу массы, тем самым усиливая водоудерживающую способность лесных подстилок и верхних горизонтов почв. Высокое содержание доступного фосфора в присутствии угля может быть связано с его накоплением в углях, образованных при невысоких температурах, когда фосфор не улетучивается при горении [16]. Такие низкотемпературные режимы горения характерны для низовых пожаров Приамурья. С другой стороны фосфор может связываться с Са и Mg, временно формируя стабильные фосфатные соединения, которые долгое время удерживаются углём, постепенно органические кислоты почв высвобождают растворимые фосфаты. Таким образом, содержание подвижного фосфора имеет положительную связь с содержанием угля благодаря низким температурам образования последнего, и минимальными газообразными потерями фосфора в процессе горения. Вероятнее всего Са и Mg фосфаты извлекаются 0,2 нормальным раствором соляной кислоты в ходе определения подвижных форм фосфора в образцах таких почв. Так же можно предположить, что Са и Mg-фосфаты доступны растениям благодаря кислотным выделениям корней, микоризы, и бактерий, извлекающих фосфор из труднодоступных форм [17].

Была обнаружена положительная связь между количеством проростков сосны и содержанием угля. Однако ни одно свойство почвы по отдельности (рН,  $\text{NH}_4^+$ , содержание подвижного фосфора, содержание влаги) не коррелирует с количеством проростков сосны. Уголь может влиять на количество проростков благодаря усилению процессов прорастания семян [8]. Несмотря на то, что мы не получили никаких подтверждающих данных о влиянии угля на увеличение числа проростков сосны, это может быть обусловлено совместным эффектом увеличения содержания доступного фосфора и влаги. В исследованиях на севере Китая, расположенном вблизи территории наших исследований было установлено, что количество доступного фосфора и влажность почвы являются лимитирующим факторами роста сосны. Тем временем нами не было обнаружено зависимости содержания угля и числа проростков лиственницы. Исходя из наших полевых наблюдений, единственным подходящим объяснением этого может быть следующее: проростки сосны по сравнению с проростками лиственницы отличаются более высокой скоростью развития, как надземной части, так и корневой системы.

В эксперименте по разложению тонких корней в присутствии постпирогенного угля установлено его значимое влияние при высоких концентрациях. На начальном этапе разложения (0-70 дней) наблюдалась интенсивная потеря массы образцов от 25 до 17 % независимо от доз угля (см. рисунок 2). Разница между вариантами эксперимента была значимой только в конце эксперимента (515 дней,  $P < 0.05$ ). По окончании эксперимента по отношению к контролю и фоновой концентрации угля потеря массы в варианте с двойной концентрацией угля составила 42 % и 40 % в варианте с максимальной концентрацией. Таким образом, тонкие корни в этих вариантах разлагались значительно быстрее чем в контрольном и фоновом вариантах, которые не имели значимых различий на протяжении всего исследуемого периода.

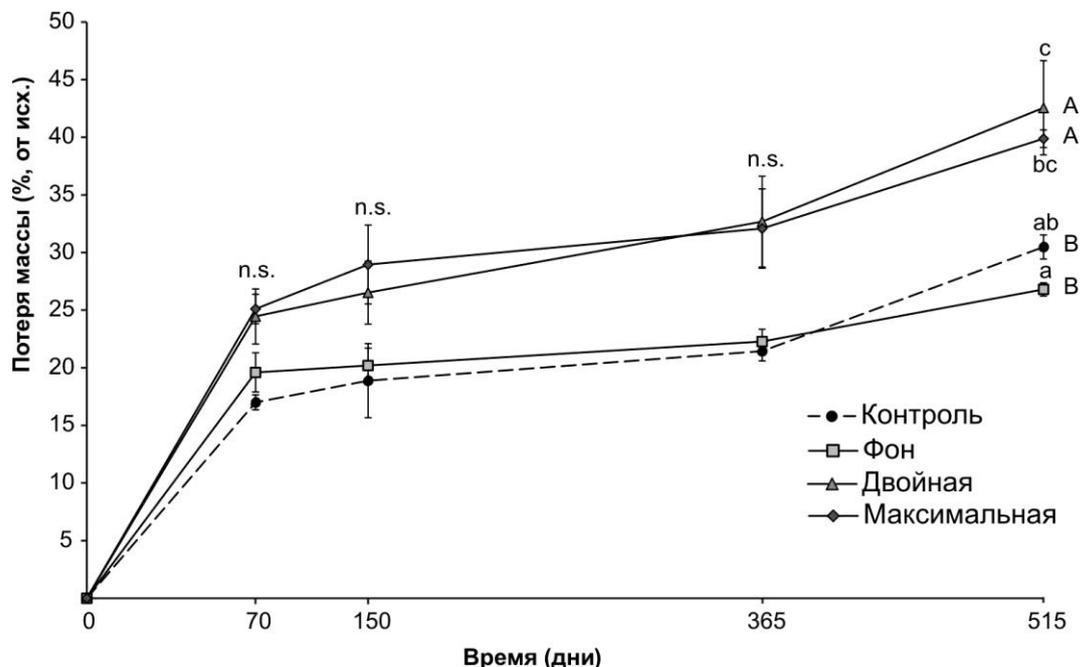


Рис. 2 – Потеря массы тонких корней лиственницы при разложении в присутствии различных концентраций постпирогенного угля

Примечание: планки погрешностей отражают стандартную ошибку средней величины SE ( $n = 5$ )

Значимость различий ( $p < 0.05$ ) между вариантами в отдельные даты отбора показана строчными латинскими буквами на основе дисперсионного анализа и апостериорного теста Стила-Двасса. Заглавные латинские буквы отражают значимые ( $P < 0.05$  с поправкой Хольма-Бонферрони) отличия скорости потери массы тонких корней в

течение всего периода разложения тонких корней на основе обобщенной линейной смешанной модели GLMM где «время» устанавливалось как случайный фактор.

Результаты эксперимента показывают, что уголь ускоряет поздние стадии разложения тонких корней. Эти результаты согласуются с аналогичными исследованиями, заключившими, что корневой опад теряет подвижные органические вещества из-за гидролиза [2], [5], однако на более поздних этапах потеря массы обусловлена биодеструкцией лигнина и целлюлозы – наиболее труднорастворимых ароматических полимеров [3], [8]. Это позволяет предположить, что уголь может усиливать микробиологическую деструкцию этих веществ на поздних этапах разложения корней. Несмотря на некоторые несовершенства и ограничения метод инкубации образцов в нейлоновых мешочках широко используется в исследованиях мирового уровня [3], [7]. Наши результаты показывают определяемое и зависящее от концентрации влияние угля на разложение тонких корней. Потеря массы увеличивалась с увеличением концентрации угля, однако связь была не линейной. Фоновая концентрация угля не оказывала влияния на разложение корней, при этом двойная средняя и максимальная концентрации имели сходный эффект. Содержание угля в исследуемых лесах изменяется в пределах от 0 до 3,9 г/кг почвы в слое 10 см, указывая на значительную неоднородность накопления угля в почвах, что характерно при сгорании стволов деревьев и пней. Следовательно, стимуляция процессов биодеструкции происходит так же неравномерно.

#### Заключение

Обнаружена большая пространственная вариабельность в содержании угля в почвах постпирогенных бореальных лесов. Средние показатели характеризуются как высокие, что подтверждается высокой периодичностью лесных пожаров в изучаемой зоне. Постпирогенный уголь играет значимую роль в динамике бореальных лесов Дальнего Востока, оказывая влияние на возобновление хвойных первичных лесов и изменяя почвенные свойства. Постпирогенный уголь способствует накоплению в почвах стабильного органического вещества благодаря ускорению разложения тонких корней лиственницы.

#### Финансирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-05-00305.

#### Funding

The reported study was funded by RFBR according to the research project № 19-05-00305.

#### Конфликт интересов

Не указан.

#### Conflict of Interest

None declared.

#### Список литературы / References

1. Deluca T.H. Boreal forest soil carbon: distribution, function and modelling / Deluca T.H., Boisvenue C. // *Forestry*. 2012. Vol. 85, № 2. P. 161–184.
2. Lehmann J. A handful of carbon / Lehmann J. // *Nature*. 2007. Vol. 447, № 7141. P. 143–144.
3. Jones M.W. Global fire emissions buffered by the production of pyrogenic carbon / Jones M.W. et al. // *Nat. Geosci.* Springer US, 2019. Vol. 12, № 9. P. 742–747.
4. Wardle D.A. Fire-Derived Charcoal Causes Loss of Forest Humus / Wardle D. A., Nilsson M.-C., Zackrisson O. // *Science* (80-. ). 2008. Vol. 320, № 5876. P. 629–629.
5. Pellegrini A.F. Fire frequency drives decadal changes in soil carbon and nitrogen and ecosystem productivity / Pellegrini A.F.A. et al. // *Nature*. Nature Publishing Group, 2018. Vol. 553, № 7687. P. 194–198.
6. Pingree M.R.A. Adsorption capacity of wildfire-produced charcoal from Pacific Northwest forests / Pingree M.R.A. et al. // *Geoderma*. 2016. Vol. 283. P. 68–77.
7. Wardle D.A. Biodiversity and Plant Litter: Experimental Evidence Which Does Not Support the View That Enhanced Species Richness Improves Ecosystem Function / Wardle D.A., Bonner K.I., Nicholson K.S. // *Oikos*. 1997. Vol. 79, № 2. P. 247.
8. Makoto K. Buried charcoal layer and ectomycorrhizae cooperatively promote the growth of *Larix gmelinii* seedlings / Makoto K. et al. // *Plant Soil*. 2010. Vol. 327, № 1–2. P. 143–152.
9. Pluchon N. Stimulation of boreal tree seedling growth by wood-derived charcoal: Effects of charcoal properties, seedling species and soil fertility / Pluchon N. et al. // *Funct. Ecol*. 2014. Vol. 28, № 3. P. 766–775.
10. Bryanin S. V. Fire-derived charcoal affects fine root vitality in a post-fire Gmelin larch forest: field evidence / Bryanin S. V., Makoto K. // *Plant Soil. Plant and Soil*, 2017. Vol. 416, № 1–2. P. 409–418.
11. Kätterer T. Roots contribute more to refractory soil organic matter than above-ground crop residues, as revealed by a long-term field experiment / Kätterer T. et al. // *Agric. Ecosyst. Environ*. 2011. Vol. 141, № 1–2. P. 184–192.
12. Gustafsson Ö. Quantification of the Dilute Sedimentary Soot Phase: Implications for PAH Speciation and Bioavailability / Gustafsson Ö. et al. // *Environ. Sci. Technol*. 1997. Vol. 31, № 1. P. 203–209.
13. Makoto K. The growth of *Larix gmelinii* seedlings as affected by charcoal produced at two different temperatures / Makoto K. et al. // *Biol. Fertil. Soils*. 2011. Vol. 47, № 4. P. 467–472.
14. R Development Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2017.
15. Preston (pyrogenic) carbon: a synthesis of current knowledge and uncertainties with special consideration of boreal regions / Preston C.M., Schmidt M.W.I. // *Biogeosciences*. 2006. Vol. 3, № 4. P. 397–420.
16. DeLuca T.H. Wildfire-Produced Charcoal Directly Influences Nitrogen Cycling in Ponderosa Pine Forests / DeLuca T.H. et al. // *Soil Sci. Soc. Am. J*. 2006. Vol. 70, № 2. P. 448.
17. Clemmensen K.E. Roots and Associated Fungi Drive Long-Term Carbon Sequestration in Boreal Forest // Clemmensen K.E. et al. // *Science* (80-. ). 2013. Vol. 339, № 6127. P. 1615–1618.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.90.12.033>

## ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ КОРРЕЛЯЦИИ АМПЛИТУДЫ АЛЬФА КОЛЕБАНИЙ ПРЕДСКАЗЫВАЮТ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОЧЕЙ ПАМЯТИ

Научная статья

Беляева В.<sup>1</sup>, Ермолова М.<sup>2</sup>, Новиков Н.<sup>3</sup>, Гуткин Б.<sup>4</sup>, Феурра М.<sup>5</sup>, Феделе Т.<sup>6</sup>\*

<sup>6</sup>ORCID: 0000-0001-7574-8062;

<sup>1</sup> Лаборатория неврологических решений, Департамент медицинских наук и технологий, Швейцарский федеральный технологический институт, Цюрих, Швейцария;

<sup>2, 3, 4, 5, 6</sup> Институт Когнитивных Нейронаук, Центр Нейроэкономики и Когнитивных Исследований, Научно-Исследовательский Университет Высшая Школа Экономики, Москва, Россия;

<sup>4</sup> Исследовательский центр PSL, Школа высшего образования, Париж, Франция

\* Корреспондирующий автор (fedele.tm[at]gmail.com)

### Аннотация

Способность успешно выполнять задачу поддерживается путем подавления лишней информации. Предыдущие исследования показали, что альфа-колебания (8-15 Гц) играют ключевую роль в защите важной информации от отвлекающих факторов во время выполнения задачи на рабочую память (РП). В данном исследовании мы изучили, как временная динамика альфа-ритма в состоянии покоя предсказывает успешность РП в модифицированной парадигме Штернберга с задержкой сравнения.

Мы предполагаем, что поведенческие характеристики могут быть предсказаны динамикой колебательной активности в покое. Для этого мы использовали долговременную корреляцию (LRTC), новый и надежный подход к количественной оценке баланса между возбуждением и торможением в нейронных сетях.

Активность коры мозга испытуемых в покое была записана перед выполнением задания на РП с помощью электроэнцефалографии (ЭЭГ). LRTC измерялись в покое в альфа-диапазоне, чтобы предсказать индивидуальные различия в успешности РП.

Мы обнаружили, что LRTC лобной доли в состоянии покоя предсказывают индивидуальный уровень точности в задаче на РП. Важно отметить, что в спектральной мощности ЭЭГ в состоянии покоя никакого эффекта не наблюдалось.

В то время как лобная кора, как известно, участвует в подавлении отвлекающих факторов, мы показываем в данной статье, что способность переключаться между вниманием и сенсорным подавлением может быть измерена уже во временной нейронной динамике как характеристика отдельного человека.

**Ключевые слова:** рабочая память, ЭЭГ, альфа колебания, долговременные корреляции.

## LONG-RANGE TEMPORAL CORRELATIONS IN THE AMPLITUDE OF ALPHA OSCILLATIONS PREDICT WORKING MEMORY PERFORMANCE

Research article

Beliaeva V.<sup>1</sup>, Ermolova M.<sup>2</sup>, Novikov N.<sup>3</sup>, Gutkin B.<sup>4</sup>, Feurra M.<sup>5</sup>, Fedele T.<sup>6</sup>\*

<sup>6</sup>ORCID: 0000-0001-7574-8062;

<sup>1</sup> Decision Neuroscience Laboratory, Department of Health Sciences and Technology, Eidgenössische Technische Hochschule (ETH), Zurich, Switzerland;

<sup>2, 3, 4, 5, 6</sup> Institute of Cognitive Neuroscience, Centre for Cognition and Decision Making, National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia;

<sup>4</sup> Research University Ecole Normale Supérieure, Paris, France

\* Corresponding author (fedele.tm[at]gmail.com)

### Abstract

The ability to successfully perform a task is supported by inhibition of irrelevant information. Evidence showed that alpha oscillations (8-15 Hz) play a key role in protecting relevant information from the appearance of distractors during a working memory (WM) task. Here, we investigated how the temporal dynamics of alpha rhythm at rest predict the WM performance in a modified delay-match Sternberg paradigm.

We hypothesize that the behavioral performance can be predicted by the dynamics of oscillatory activity at rest. To this end we used Long-Range Temporal Correlation (LRTC), a novel and reliable approach to quantify the balance between excitation and inhibition in neuronal networks.

Subjects were recorded with scalp EEG during rest before undergoing the WM task. LRTC were measured at rest in the alpha band in order to predict the inter-individual differences in the WM performance.

We found that LRTC at rest over frontal cortex were predictive of the level of accuracy in the WM task across individuals. Importantly, no effect was visible when considering spectral EEG power at rest.

While frontal cortex is known to be involved in suppressing distractor interference, we show here that the ability to switch between attention and sensory suppression can be measured already in the neural temporal dynamic as a feature of the single individual.

**Keywords:** working memory, EEG, alpha oscillations, long range temporal correlations.

## Introduction

The ability to efficiently filter relevant from irrelevant information supports the individual working memory (WM) performance. Indeed, in our everyday life it is crucial to have mechanisms that can inhibit distracting information. Inhibiting information that is irrelevant is a core executive function of the working memory system [12]. Behavioral and electrophysiological studies showed that suppressing distractors during a WM task [1], [20] and the dropping unnecessary information from WM [14], [20] tend to improve the retrieval of information that is relevant to the task. This suggests that mechanisms involving cognitive control have an important role in protecting relevant versus irrelevant information. Evidence showed that suppression of irrelevant information has a neural correlate which is represented by alpha oscillatory activity in parieto-frontal network. The increase of alpha activity protects against anticipated distractors [1]. Indeed, oscillations at different frequencies reflect different behaviors and cognitive processes that underly different states of neural network activity as typically measured with electroencephalography (EEG) and magnetoencephalography (MEG) [4], [11]. We should further note that spontaneous neural oscillatory activity in brain is highly variable in its duration, as well as amplitude, frequency and recurrence. It is believed that such oscillations reflect functional states, and thus we can assume that at rest, these spontaneous patterns which seem to be unpredictable, show statistical similarities (specifically power law scaling behavior of a particular observable) defined as “Long Range Temporal Correlations” (LRTC) [16], [18]. In this paper we hypothesize that resting-state alpha-rhythm temporal dynamics maybe predictive of behavioral performance. We used a modified version of WM-task implemented in [1], a delay-match Sternberg paradigm which elicited enhancement in parieto-occipital alpha as an indicator of attention suppression during the maintenance period of visual working memory. Here we test whether the neural dynamic that describes how excitation and inhibition are balanced in the single individual at rest can indicate the ability to efficiently employ cognitive control.

## Methods

All experiments in this study conformed to the relevant guidelines and regulations. Informed consent was obtained from all participants. The study was approved by the local Ethics Committee of the Higher School of Economics, Moscow.

The study involved 15 subjects aged from 18 to 26 years (9 women, mean age = 22.5, SD = 2.3). Subjects were right-handed, with no history of neurologic or psychiatric disorders, and with good or corrected eye-sight. 2 participants' resting state data had technical problems, so 13 participants' data was used for the analysis (8 women, mean age = 22.6, SD = 2.4).

The paradigm was a modified version of the Sternberg task [24]. In each trial a set of 5 symbols was shown sequentially to the subject. Each presentation lasted 33 ms with an inter stimulus interval of 1.1 s. At the end, one probe symbol was presented. The task was to identify whether the probe was part of the proposed set. We implemented three different conditions: 1) Load 5 condition, where all 5 symbols had to be memorized; 2) strong distractor condition, where the 5th item was a distractor which had to be ignored (the distractor was a symbol similar to the presented set) 3) weak distractor condition, where the 5th item was a distractor which again had to be ignored (the distractor was a symbol easily distinguishable from to the presented set). At 1.1 s. from the onset of the 5th symbol, the probe was staying on the screen until the answer was given by button press. Accuracy and reaction time were recorded as measures of performance. For the analysis of reaction time, only correct trials were used. One session of the task consisted of 180 trials, with 60 trials for each condition.

The experiment was conducted in 2 days. The first day was a training day, when participants trained on 3 sessions of a behavioral task. The second day consisted of 2 parts: recording of resting state EEG and behavioral task. The EEG/EMG data were recorded with BrainAmp amplifiers and BrainVision Recorder software (Brain Products GmbH, Munich, Germany). For the recording of EEG, a standard montage with 64 electrodes was employed with mastoid electrodes used to record oculography. Throughout the experiment skin resistance was kept under 10 kOhm. Resting state recording included 10 minutes of eyes-open resting with eyes fixated on a black screen.

EEG data was preprocessed in EEGLAB toolbox within MATLAB software. The EEG signal was filtered between 2 and 40 Hz and re-referenced to an average reference. The data from oculography electrodes was not included in the average reference calculation. Signal was visually inspected and periods contaminated by motor artifacts were removed from the data. Heavily contaminated channels were excluded from the analysis. Eye movements were corrected by independent component analysis.

## Data analysis

### Analysis of behavioral data

We used ez package [9] in RStudio to run repeated measures Analysis of variance (ANOVA) with factor Condition (Load5, Strong, Weak) and two dependent variables: accuracy and reaction time (RT). Difference between conditions was compared with paired-sample t-test. Greenhouse-Geiser correction was applied for data, which violated the assumption of sphericity.

Behavioral measurements were recorded during EEG session for 15 subjects. Accuracy was calculated as percentage of correct answers in all trials. RT was analyzed only for correct responses. Trials, where 5th stimulus was the same as the probe, were removed from analysis.

To find main effect of LRTC on general working memory performance we averaged accuracy and RT by subject in three conditions of our task. We took behavioral data from 13 subjects, to correlate with LRTC scores, while 2 subjects did not have resting state recordings (for reasons described in Subjects section).

### Long Range Temporal Correlations (LRTC)

In order to investigate, how temporal dynamics of alpha oscillation impact working memory performance, we calculated Long Range Temporal Correlations (LRTC) in the alpha spectral range during a 10 minutes resting state session preceding the working memory task.

First, we defined for each participant the individual alpha peak. For the single subject, we computed the power spectral density of each EEG channel and averaged across channels. We used Welch estimation with Hanning window of 2 s. We visually identified the alpha peak for each subject. Individual alpha peak varied from 8.5 Hz to 13 Hz (mean = 10.7, SD = 1.03,

median = 11). To calculate LRTC we used Neurophysiological Biomarker Toolbox (NBT) toolbox v0.5.5, which functionality is described elsewhere [8].

First, we filtered the signal for each electrode within following range: individual alpha frequency  $\pm 2$  Hz. Then we extracted amplitude envelope with Hilbert transform  $a(t)$  and calculated cumulative sum of the signal  $Y(t)$  as

$$Y(t) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N a(t) \tag{1}$$

The whole rest recordings were divided into windows  $\tau$  ranging from 3 to 57 seconds with 50% overlap. These windows were equally spaced on the logarithmic scale. The signal  $Y(t)$  was detrended and the fluctuation function  $F(\tau)$  in each time window  $\tau$  computed according to

$$F^2(\tau) = \sum_{n=1}^N [Y(t) - Y_{\tau}(t)]^2 \tag{2}$$

This procedure was repeated for each time window  $\tau$ . The window length and the fluctuation were represented on a double logarithmic scale, and a least-squares line was fitted to these values. The slope of this line is the scaling exponent  $\nu$ , which ranges from 0.5 to 1 and indicated the presence of LRTC.

The LRTC scaling exponent was calculated for each channel within each subject during rest.

**Correlation between LRTC and behavioral data**

The matrix of LRTC scaling exponents (with dimension subject  $\times$  channels) was then used for correlation with accuracy and RT (vectors with dimension 1  $\times$  subjects). This step was implemented with Fieldtrip toolbox [17] in Matlab. For each EEG electrodes we obtained a Pearson’s correlation across subjects between subject’s LRTC scaling exponents in each electrode and behavioral outcomes. In order to account for multiple comparisons, we used cluster statistics [13]. Clusters were defined as two or more neighboring electrodes that demonstrated a significant correlation with  $p < 0.05$ . A null distribution was generated using the Monte Carlo method from 1000 permutations of the original data. As a result, we obtained clusters of electrodes with LRTC scaling exponents correlated with behavioral data.

For visualization purposes, LRTC scaling exponents of one representative electrode in significant cluster were correlated again with behavioral measurement.

**Results**

**Behavioral data from EEG session**

We found no significant impact of Condition on accuracy ( $F(2,26) = 1.19, p = .31$ ). Interestingly, Condition significantly influenced RT ( $F(1.3,16.77) = 4.5, p = .03$ ) (Fig. 1). Subjects were faster giving answers in Weak condition, than in Strong ( $p = .008$ ) or Load5 trials ( $p = .01$ ). The Strong and Load5 conditions did not differ significantly ( $p = 0.34$ ). This is in line with the expected task complexity.

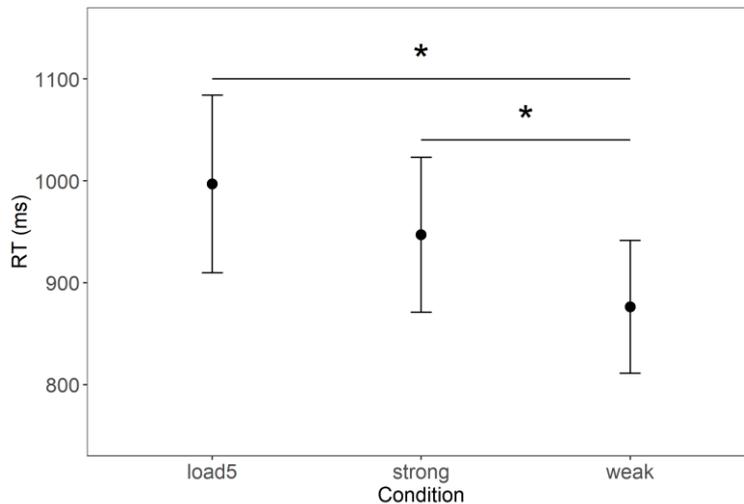


Fig. 1 – Difference in RT among three experimental conditions  
Notes: Asterisk represents significant difference

**Correlation of LRTC and behavioral data**

The major finding of the paper is the correlation of resting LRTC with the mean accuracy achieved during the behavioral WM task. We found significant frontal cluster ( $p = 0.044$ ) with 4 electrodes (F3, F7, AF3, F5), when correlated LRTC scaling factor (Fig. 2A). LRTC scores in F3 electrode, which had the highest correlation coefficient, correlated with accuracy. Significant negative correlation ( $R = -.68, p = .009$ ) was observed: subjects with higher LRTC scores in frontal region performed worse in working memory task (Fig. 2B).

No significant clusters were found for correlation of LRTC scores and RT.

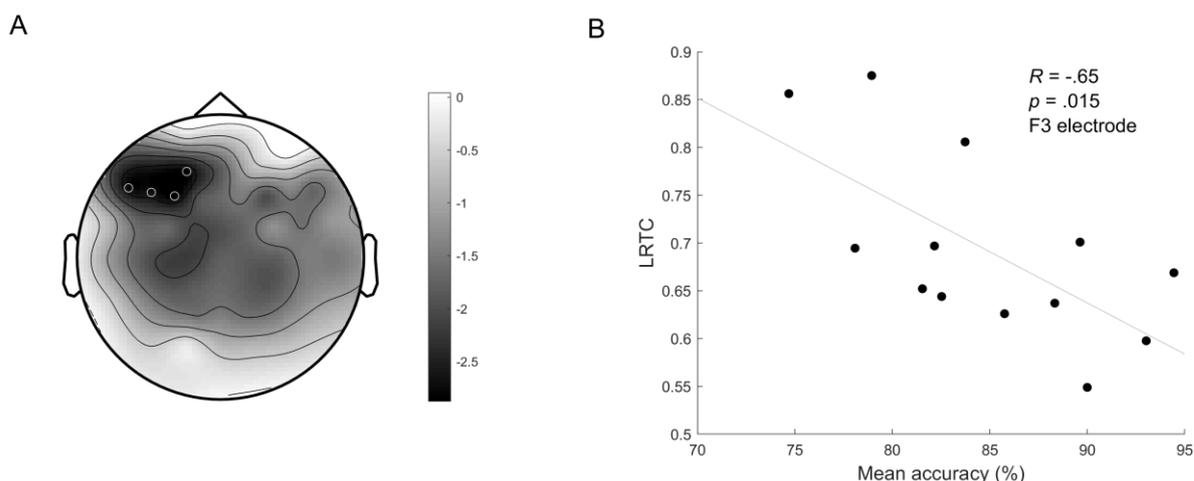


Fig. 2 – Correlation between LRTC and mean accuracy

Notes: A) Significant frontal cluster for correlation between LRTC scaling factor and mean accuracy. Topographies show the strength of Spearman's correlation for all electrodes. White dots indicate electrodes of significant cluster (F3, F7, AF3, F5). B) The slope of the least-squares fitted lines (black) corresponds to correlation between LRTC scores in F3 electrode found in significant cluster and mean accuracy

### Conclusion

LRTC have been described as an indicator of the balance between excitation and inhibition in neural networks [10], [19], this balance is a prerequisite for the efficient interaction among neural substrates [2], [21], [22]. Optimal excitation/inhibition balance allows for stable maintenance of cognitive states and modulation of neural communication (Eriksson et al., 2015). To date, LRTC have been linked to cognitive abilities to perform perceptual [18], motor [23] and decision-making [3] tasks.

In order to study the role of LRTC in working memory and attentional switch, we adapted a paradigm previously used to demonstrate the role of parieto-occipital alpha oscillations in attentional suppression [1]. Our experiments showed that while the neural oscillatory dynamics at rest in these perceptual areas did not correlate with behavioral performance, we found that we were able to predict individual performance accuracy using LRTC in left frontal cortical areas. In particular, we find that the behavioral accuracy correlates with the LRTC scaling factor at rest. The negative sign of this correlation contrasts recent findings [12], where LRTC were positively correlated with performance in a 2-back WM task. However, our protocol explicitly targets perceptual working memory, with higher working load and entails the switch of attentional state with the presentation of a distractor during the maintenance period. Moreover, while previous studies highlight the involvement of a large network, here we observe a specific role in frontal sites. Interestingly, this is in line with models of top-down modulation of prefrontal circuits in perceptual working memory [6], [7]. Direct recordings from neurons in monkeys outlined the critical role of dorsolateral prefrontal cortex (dlPFC) in distractor suppression [25]. Moreover, in the same study, reversible inactivation of the dlPFC resulted in larger performance deterioration than inactivation of areas which contribute to the perceptual selection of salient information.

Taken together, the critical state of frontal areas might be an indicator of the individual ability to exert cognitive control, which can be measured in the temporal dynamics of neural oscillation at rest. While further work is required to better characterize the relation of LRTC in the prediction of cognitive control, we demonstrated that it is possible to establish a link between neural dynamic at rest and attentional switch via top-down modulation in the framework of working memory.

### Финансирование

Исследование было выполнено в рамках проекта, поддержанного грантом РФФИ (контракт 17-11-01273).

### Funding

This work was supported by Russian Science Foundation grant (No: 17-11-01273).

### Конфликт интересов

Не указан.

### Conflict of Interest

None declared.

### Список литературы / References

1. Bonnefond, M. Alpha oscillations serve to protect working memory maintenance against anticipated distracters. / M. Bonnefond, O. Jensen // *Curr.Biol.* - 2012. - Vol. 22. - P. 1969-1974.
2. Beggs, J. M. Neuronal avalanches are diverse and precise activity patterns that are stable for many hours in cortical slice cultures. / Beggs, J. M., Plenz, D. // *Journal of Neuroscience.* - 2004. - Vol. 24. - No. 22. - P. 5216–5229.
3. Colosio, M. Neural mechanisms of cognitive dissonance (revised): an EEG study. / Colosio, M., Shestakova, A., Nikulin, V.V., Blagovechtchenski, E., Klucharev, V // *Journal of Neuroscience.* - 2017. - Vol. 37. - No. 20. - P. 5074–5083.
4. Engel, A. K. Dynamic predictions: oscillations and synchrony in top-down processing. / Engel, A. K., Fries, P., Singer, W. // *Nat.Rev.Neurosci.* - 2001. - Vol. 2. - P. 704-716.
5. Eriksson, J. Neurocognitive architecture of working memory. / Eriksson, J., Vogel, E.K., Lansner, A., Bergstrom, F., Nyberg, L. // *Neuron.* - 2015. -Vol. 88. - P. 33–46.

6. Gazzaley, A. Top-down modulation: bridging selective attention and working memory. / Gazzaley, A., Nobre, A. C. // Trends in cognitive sciences. – 2012. – Vol. 16. – No. 2. – P. 129-135.
7. Geng, J. J. Attentional mechanisms of distractor suppression // Current Directions in Psychological Science. – 2014. – Vol. 23. – No. 2. – P. 147-153.
8. Hardstone, R. Detrended fluctuation analysis: a scale-free view on neuronal oscillations. / Hardstone, R., Poil, S. S., Schiavone, G., Jansen, R., Nikulin, V. V., Mansvelder, H. D., & Linkenkaer-Hansen, K. // Frontiers in physiology. - 2012. - Vol.3. - P. 450.
9. Lawrence, M. A. ez: Easy Analysis and Visualization of Factorial Experiments. / Lawrence, M. A. // CRAN R Project. - 2016. Retrieved from <https://cran.r-project.org/web/packages/ez/>
10. Linkenkaer-Hansen, K. Long-range temporal correlations and scaling behavior in human brain oscillations. / Linkenkaer-Hansen, K., Nikouline, V. V., Palva, J. M., & Ilmoniemi, R. J. // Journal of Neuroscience. – 2001. – Vol. 21. – No. 4. – P. 1370-1377.
11. Llinas, R. R. Bursting of thalamic neurons and states of vigilance. / Llinas, R. R., Steriade, M. // Journal of Neurophysiology. -2006. - Vol.95. - P. 3297-3308.
12. Mahjoory, K. Power and temporal dynamics of alpha oscillations at rest differentiate cognitive performance involving sustained and phasic cognitive control. / Mahjoory, K., Cesnaite, E., Hohlefeld, F.U., Villringer, A., Nikulin, V.V. // Neuroimage. -2019. - Vol. 88. - P. 35-144.
13. Maris, E. Nonparametric statistical testing of EEG-and MEG-data. / Maris, E., & Oostenveld, R. // Journal of Neuroscience Methods. -2007. - Vol.164. - No. 1. - P. 177-190.
14. Matsukura, M. Attention effects during visual short-term memory maintenance: protection or prioritization? / Matsukura, M., Luck, S. J., Vecera, S. P. // Perceptual Psychophysics. - 2007. - Vol. 69. - P. 1422-1434
15. Miyake, A. The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex "Frontal Lobe" tasks: a latent variable analysis. / Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H., Howerter, A., & Wager, T. D. // Cogn Psychol. - 2000. - Vol. 41. - P. 49-100.
16. Nikulin, V. V. Long-range temporal correlations in electroencephalographic oscillations: Relation to topography, frequency band, age and gender. / Nikulin, V. V. & Brismar, T. // Neuroscience. - 2005. - Vol. 130. -P. 549-558.
17. Oostenveld, R. FieldTrip: open source software for advanced analysis of MEG, EEG, and invasive electrophysiological data. / Oostenveld, R., Fries, P., Maris, E., Schoffelen, J. M. // Computational intelligence and neuroscience. - 2011. - Vol.1.
18. Palva, J. M. Neuronal long-range temporal correlations and avalanche dynamics are correlated with behavioral scaling laws. / Palva, J. M., Zhihalov, A., Hirvonen, J., Korhonen, O., Linkenkaer-Hansen, K., Palva, S. // Proc.Natl.Acad.Sci.U.S.A. - 2013. - Vol.110, - P. 3585-3590.
19. Poil, S.S. Critical-state dynamics of avalanches and oscillations jointly emerge from balanced excitation/inhibition in neuronal networks. / Poil, S.S., Hardstone, R., Mansvelder, H.D., Linkenkaer-Hansen, K. // Journal of Neuroscience. - 2012. - Vol. 32. - No 29. - P. 9817–9823.
20. Schneider, D. On the neural mechanisms underlying the protective function of retroactive cuing against perceptual interference: Evidence by event-related potentials of the EEG. / Schneider, D., Barth, A., Getzmann, S., Wascher, E. // Biological Psychology, - 2017 -V.124. -P. 47-56.
21. Shew, W. L. Information capacity and transmission are maximized in balanced cortical networks with neuronal avalanches. / Shew, W. L., Yang, H., Yu, S., Roy, R., & Plenz, D. // Journal of neuroscience. – 2011. – Vol. 31. – No. 1. – P. 55-63.
22. Shew, W.L. The functional benefits of criticality in the cortex. / Shew, W.L., Plenz, D. // Neuroscientist. - 2013. - Vol.19. - No 1. - P. 88–100.
23. Smit, D. J. A. Long-range temporal correlations in resting-state alpha oscillations predict human timing-error dynamics. / Smit D. J. A., Linkenkaer-Hansen K., de Geus E. J. C. // Journal of Neuroscience. – 2013. – Vol. 33. – No. 27. – P. 11212-11220.
24. Sternberg, S. High-speed scanning in human memory // Science. – 1966. – T. 153. – №. 3736. – C. 652-654.
25. Suzuki, M. Distinct neural mechanisms of distractor suppression in the frontal and parietal lobe. / Suzuki, M, Gottlieb, J. // Nat. Neurosci. -2013. - Vol.16. - No 1. - P. 98-104.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.90.12.034>

## ПАПОРОТНИКООБРАЗНЫЕ КОЛЛЕКЦИИ ОРАНЖЕРЕИ ЮУБСИ УФИЦ РАН

Научная статья

Кашаева Г.Г.<sup>1</sup>, Якупова В.В.<sup>2</sup>, Лебедева М.В.<sup>3</sup> \*

<sup>1</sup>ORCID: 0000-0002-5020-527X;

<sup>1, 2, 3</sup> Южно-Уральский ботанический сад-институт УФИЦ РАН, Уфа, Россия

\* Корреспондирующий автор (lebedevamv[at]mail.ru)

### Аннотация

Проведена таксономическая ревизия коллекции папоротникообразных оранжереи ЮУБСИ УФИЦ РАН (27 видов и 3 культивара из 20 родов, 10 семейств). Проведен анализ географического распространения и экологической приуроченности видов коллекции. Установлены габитуальные параметры 22 видов в условиях оранжереи. На основании морфологических характеристик и жизненных форм растений предложены способы использования для целей фитодизайна. Охарактеризован потенциал коллекции как инструмента реализации научно-просветительских программ ботанического сада согласно принципам непрерывного экологического образования.

**Ключевые слова:** папоротникообразные, коллекция папоротников, оранжерея, экологическое образование.

## FERNLIKE PLANT COLLECTIONS IN GREENHOUSE OF SUBGI UFSRC OF RAS

Research article

Kashaeva G.G.<sup>1</sup>, Yakupova V.V.<sup>2</sup>, Lebedeva M.V.<sup>3</sup> \*

<sup>1</sup>ORCID: 0000-0002-5020-527X;

<sup>1, 2, 3</sup> South Ural Botanical Garden Institute, UfSRC of RAS, Ufa, Russia

\* Corresponding author (lebedevamv[at]mail.ru)

### Abstract

The authors conducted a taxonomic revision of the of fernlike plant collections in the greenhouses of the SUBGI UfSRC of RAS (27 species and 3 cultivars from 20 genera, 10 families). The analysis of the geographical distribution and ecological confinement of the species in this collection is carried out. The authors established habitual parameters of 22 species in the greenhouse. The phytodesign methods are proposed based on the morphological characteristics and life forms of plants. The potential of the collection as a tool for the implementation of scientific and educational programs of the botanical garden in accordance with the principles of continuous environmental education is described in this paper.

**Keywords:** fernlike plants, fernlike plant collection, greenhouse, environmental education.

Коллекции тропических и субтропических растений в ботанических садах традиционно являются важным звеном изучения и сохранения биоразнообразия [1], [2]. Помимо формирования коллекции и проводимой на ее основе научно-исследовательской работы возрастает экспозиционная значимость данных объектов и роль ботанических коллекций как инструментов научно-просветительской работы [3]. Споровые растения привлекаются в качестве объектов и наглядных пособий в учебно-практической деятельности гораздо реже, чем семенные, что сужает представления обучающихся о разнообразии мира растений. Присутствие представителей различных климатических зон и географических областей, различных жизненных форм, а также принадлежность большинства папоротникообразных к группе сциофитов – все это делает коллекцию папоротникообразных ценным и важным компонентом при построении эколого-географических экспозиций для реализации научно-просветительских программ ботанического сада согласно принципам непрерывного экологического образования [4], [5].

Папоротники (отдел Папоротниковидные) относят к числу наиболее древних групп высших растений, наряду с плауновидными и хвощевидными. Но если последние две группы играют в современном растительном покрове незначительную роль, разнообразие папоротников по-прежнему очень велико (в настоящее время насчитывается около 300 родов и более 10 000 видов). Папоротники характеризуются весьма широким географическим распространением, и широким диапазоном местообитаний. Наибольшее разнообразие приурочено к биотопам влажных тропических лесов (почве, стволам деревьев, скалам, камням). Результатом приспособления к столь разнообразным условиям стали разные жизненные формы и большое разнообразие во внешней форме, внутреннем строении, физиологических особенностях и размерах [6].

Оранжерея Южно-Уральского ботанического сада-института по своим макроклиматическим параметрам соответствует условиям влажных субтропиков (температура осенне-зимнего периода в среднем составляет 14°C, летнего периода 23 °C, влажность воздуха 79-98%, освещенность в теневых зонах 950-1800 лк ). Авторами поставлена задача охарактеризовать состав коллекции папоротникообразных, морфологические особенности видов в условиях оранжереи, провести анализ географического распространения и экологических особенностей видов по материалам международных агрегаторов данных по биоразнообразию [7], [8] [9], а также показать возможности применения видов коллекции для целей фитодизайна и научно-просветительской деятельности.

Проведена таксономическая ревизия коллекции папоротникообразных оранжереи ЮУБСИ УФИЦ РАН. Согласно современной номенклатуре, приведенной по данным справочной системы theplantlist.org, коллекция включает 27 видов и 3 культивара из 20 родов, 10 семейств.

Анализ ареалов (таб. 1.) показал, что 22 вида характеризуются распространением в пределах тропического пояса. В их числе как виды пантропического распространения (Нефролепис возвышенный, Птерис критский) так и представители флор отдельных областей Земного шара (Восточной и Юго-восточной Азии, Австралии и Новой

Зеландии, Южной Африки и о-ва Мадагаскар, Центральной и Южной Америки). В меньшей степени в коллекции представлены виды субтропического (5 видов) и южной части умеренного пояса (2 вида). Характеристика географического распространения затрудняется тем, что многие виды наряду с естественным характеризуются широким интродукционным ареалом, а некоторые и высоким инвазионным потенциалом (Нефролепис сердцевидный, Лигодиум японский) [10].

Высоко разнообразие представленных в коллекции жизненных форм. К наземным травянистым растениям отнесены 12 видов (Циртомиум серповидный, Многорядник печальный, Адиантум хвостатый и др.). В группу эпифитных растений относятся 6 видов (Даваллия канарская, Платициериум дваждывилчатый, Многоножка золотистая и др.).

Таблица 1 – Эколого-географическая характеристика представителей отдела Папоротникообразные коллекции оранжереи ЮУБСИ УФИЦ РАН (по данным: [7], [8] [9])

Вид	Экологическая приуроченность	Географическая приуроченность	Форма роста
<i>Семейство Adiantaceae</i>			
<i>Adiantum capillus-veneris</i> L.	Адиантум венерин волос	леса умеренного и субтропического пояса, скалы	Америка, Евразия, Австралия
<i>Adiantum hispidulum</i> Sw.	Адиантум мелкоопушенный	леса тропического пояса, скальный,	Африка, Австралия, Полинезия, Н. Зеландия
<i>Adiantum caudatum</i> L.	Адиантум хвостатый	тропические леса, каменистые местообитания	Ю.-В. Азия
<i>Семейство Aspleniaceae</i>			
<i>Asplenium bulbiferum</i> G. Forst.	Асплениум луковиченосный	Тропические леса, близ ручьев, на скалах около водопадов	Австралия, Н. Зеландия
<i>Asplenium nidus-avis</i> L.	Асплениум гнездовой	Тропические леса	Африка, Азия
<i>Asplenium viviparum</i> Presl.	Асплениум живородящий	Тропические леса	Мадагаскар
<i>Stenochlaena tenuifolia</i> (Desv.) T. Moore	Стенохлаена узколистная	Тропические леса	Южная Африка, Мадагаскар
<i>Stenochlaena palustris</i> (Bur m. f.) Bedd.	Стенохлаена болотная	Тропические леса	Ю-В Азия, Австралия, Океания
<i>Семейство Blechnaceae</i>			
<i>Blechnum gibbum</i> Mett.	Блехнум горбатый	Тропические леса, нижний ярус	Новая Каледония
<i>Семейство Davalliaceae</i>			
<i>Davallia canariensis</i> (L.) Smith	Давалия канарская	леса умеренного климата	Португалия Испания, Марокко
<i>Humata puxidata</i> (Cav.) Desv.	Хумата сжатая	тропические леса	Австралия
<i>Семейство Dryopteridaceae</i> Herter			
<i>Cyrtomium falcatum</i> (Lf) C. Presl	Циртомиум серповидный	субтропические леса	восточная Азия
<i>Polystichum luctuosum</i> (Kunze) T. Moore	Многорядник печальный	тропические леса	В ЮВ Азия
<i>Семейство Polypodiaceae</i>			
<i>Drynaria quercifolia</i> (L.) J. Sm	Дринария дуболистная	тропические леса	Индия, ЮВ Азия Австралия
<i>Drynaria bonii</i> Christ.	Дринария бонна	тропические леса	Индия, ЮВ Азия

Окончание табл. 1 – Эколого-географическая характеристика представителей отдела Папоротникообразные коллекции оранжереи ЮУБСИ УФИЦ РАН (по данным: [7], [8] [9])

Вид		Экологическая приуроченность	Географическая приуроченность	Форма роста
<i>Platyserium bifurcatum</i> (Cav.) C. Chr.	Платицерум двудыперистый	тропические леса	Австралия, Океания	эпифит
<i>Lepisorus macrosphaerous</i> (Baker) Ching	Леписорус макросферус	горные леса тропического пояса	Китай, Индия	эпифит
<i>Phymatosorus pustulatus</i> (G. Forst) Large Braggins, P.S. Green	Фиматосорус пятнистый	тропические леса, деревья, камни	Новая Зеландия	наземное травянистое растение, эпифит
<i>Microsorium punctatum</i> (L.) Copel	Микрозорум точечный	тропические леса	Австралия, океания, ЮВ Азия	наземное травянистое растение, эпифит
<i>Phlebodium aureum</i> L.	Флебодиум золотистый	Леса тропического и субтропического пояса	Центральная и Южная Америки	эпифит
<i>Pyrrhosia lingua</i> (Thunb.) Farw	Пиррозия язычкова	Горные леса субтропического пояса	ЮВ Азия	эпифит
Семейство <i>Pteridaceae</i>				
<i>Pteris cretica</i> L.	Птерис критский	Тропические и субтропические леса	пантропик	наземное травянистое растение
<i>Pteris cretica</i> L. 'Albo-Lineata'	Птерис критский	-	декоративная форма	наземное травянистое растение
<i>Pteris cretica</i> L. 'Alexandrae'	Птерис критский	-	декоративная форма	наземное травянистое растение
<i>Pteris longifolia</i> L.	Птерис длиннолистный	Тропические и субтропические леса	Центральная Америка	наземное травянистое растение
<i>Pteris cretica</i> cv. gaultrichii	Птерис критский	-	декоративная форма	наземное травянистое растение
Семейство <i>Nephrolepidaceae</i>				
<i>Nephrolepis cordifolia</i> (L.) C. Presl	Нефролепис сердцелистный	тропические леса	Северная Австралия	наземное травянистое растение, эпифит
<i>Nephrolepis exaltata</i> (L.) Schott	Нефролепис возвышенный	тропические леса	пантропик	наземное травянистое растение, эпифит
Семейство <i>Salviniaceae</i>				
<i>Salvinia natans</i> (L.) All.	Сальвиния плавающая	Водоемы	Тропический, субтропический и умеренный пояс	водный
Семейство <i>Schizaeaceae</i>				
<i>Lygodium japonicum</i> (Thunb.) Sw. Show	Лигодиум японский	Тропические и субтропические леса и опушки	В, ЮВ Азия, Океания	травянистая лиана

Отдельно можно выделить 3 вида папоротников, которые могут представлять и эпифиты, и наземные растения. Древовидные папоротники и травянистые лианы немногочисленны.

Проведено сравнение морфологических параметров видов по данным измерений образцов коллекции оранжереи (таб. 2) с характеристикой видов в природных условиях, выполненной по литературным данным [11], [12], [13] и приведенной ниже.

В описании морфологических особенностей видов использованы следующие общепринятые сокращения: р. – растения, л. – листья, лст. – листочки, чрш. – черешок, л.п. – листовая пластинка, ц.ж. – центральная жилка, ВАЖ – внутриареольная жилка, крщ – корневище, дл. – длина, шир. – ширина.

**Семейство Adiantaceae**

*Adiantum capillus-veneris* L. Л. сложные почти всегда дважды перистые, в очертаниях продолговато-овальные, 20-40 см в дл.; лст. Лопастные, клиновидные у основания, сверху б.м. ровно закругленные, глубоко вееровидно надрезанные. Доли тупые, широкие до линейных, часто круглозубчатые, нежно-травянистые, пленчатые, 2,5-3 см в дл. и 1,5-2 см шир.; сорусы на вершине долей листочка, сверху чуть выемчатые, округлые и обратно-почковидные; чрш. 10-15 см дл., тонкий, черный, глянцевый.

*Adiantum hispidulum* Sw. Л. сложные, выглядят как пальчатосложные, не более 40 см в дл.; лст. темно- или тускло-зеленые, округло-ромбовидные, прижатые к чрш., с обеих сторон щетинисто-опушенные, мелко-зубчатые, 1,5-2 см дл. и 0,5 см шир.; чрш. крепкий, буроватый, мелко щетинистый, 15-30 см дл.; сорусы расположены густо, их покровы тоже со щетинками.

*Adiantum caudatum* L. Л. сложные, однажды перистые, в очертаниях линейные; в основании л. листочки расположены плотно, к концу все реже и реже; лст. мелкие, 1-2 (0,2-3) см, обычно многочисленны, гребневидно-крыловидные кожистые, темно-зеленые; свисающая вниз конечная часть рахиса часто укореняется; рахис, как и чрш., с красновато-коричневым опушением, лежащий или свисающий.

**Семейство Aspleniaceae**

*Asplenium bulbiferum* G. Forst. Л. перисторассеченные, однажды-дважды перистые; л. в очертаниях овально-треугольные, широкие, с широкими ланцетными долями, от 30 до 120 см дл.; на каждой доле по одному сорусу; дочерние р. образуются из бульбочек у ц.ж. долей.

*Asplenium nidus-avis* L. Р. крупное, в виде большой розетки или воронки; л. от горизонтально до прямо вверх направленных, на очень коротком чрш., линейные, цельнокрайние, до 2 м дл. и до 20-60 см шир.; сорусы только в верхней трети л.; узколинейные, расположены очень близко друг к другу между соседними ж., но попарно не сливаются, под углом примерно 45 градусов к ц.ж., ближе к краю л.п., несколько отличаются по длине; узкие индузии повторяют форму соруса, открыты со стороны ж.

*Asplenium viviparum* Presl. Л. с короткими черешками, дважды- и четырежды перистые, 40-60 см дл., шириной 15-20 см, кожистые, матово-зеленые, дуговидно изогнутые с очень узкими, линейными, густо расположенными долями. Сорусы расположены по краю сегментов. На верхней стороне л. развиваются выводковые почки.

**Семейство Blechnaceae**

*Blechnum gibbum* Mett. Крупное р. с древовидным стволом 0,5-1 м выс. с густой розеточной кроной, напоминающее пальму; л. диморфные; фертильные л. с настолько узкими сегментами, что ценосорусы занимают практически все пространство между ц. ж. и краем л.п.; таким образом, индузий находится у самого края л.; 60-100 см дл., около 20 см шир., в очертаниях удлинено-овальные, широко-линейные, ярко-зеленые, однажды перистые; сегменты стерильных л. перпендикулярны рахису, линейные, заостренные, в основании с ушковидными придатками, 10 см и более в дл., до 1 см шир., края явно волнистые; спороносные л. несколько короче стерильных, их сегменты более узкие и редко расположенные; чрш. короткий, у основания густо покрыт темно-коричневыми волосками.

**Семейство Davalliaceae**

*Davallia canariensis* (L.) Smith Л. четырежды перистые, почти кожистые, плотные, 30-45 см дл., 22-30 см шир.; последние спороносные сегменты клиновидно-линейные с 1-3 бокаловидными сорусами на вершине и б.ч. с роговидным тупым зубом снаружи от соруса; свободный край индузия почти ровный (не резко выемчатый), дл. индузия незначительно превышает его шир.; чрш. с редкими нитевидными волосками; крш. почти прямое.

*Humata pyxidata* (Cav.) L. трижды перистые, 25-32 см дл., 15-20 см шир., б.м. треугольные в очертаниях; крш. Почти прямое, толстое, чешуйчатое; чрш. примерно равен по дл. л.п., направлен почти вверх, при этом л.п. горизонтально направлены или свисают вниз; длина индузия превышает его ширину.

**Семейство Nephrolepidaceae**

*Nephrolepis cordifolia* (L.) C. Presl. Л. в очертаниях лентовидные однажды-перистые, 30-60 см дл., вначале прямостоячие, затем дуговидно-поникающие; доли л.п. удлинено-треугольные, до 3 см дл и 1,5 см шир., в основании сердцевидные или с ушком, плотно расположенные на желтоватом рахисе; на тонких побегах образуются чешуйчатые клубеньки

*Nephrolepis exaltata* (L.) Schott. Листья длинные, линейные, зеленые, почти сразу дуговидно вниз свисающие; однажды-перистые (у форм – до многократно перистых); рахис и листочки часто с красноватым пушком; сорусы не приближаются к краю л.; р. не образуют подземных клубеньков

**Семейство Dryopteridaceae**

*Cyrtomium falcatum* (L.) C. Presl Крш. короткое, прямое; л. однажды перистые, жесткие, рахис прямой, 35-50 см дл., 12-15 см шир.; лст. очередные, в основании цельнокрайние, сбоку и сверху – длинно- и острозубчатые, косо ромбические, кожистые, зеленые, глянцевитые, б.ч. серповидно-изогнутые, ок. 10 см дл. и 2,5-4 см шир.; чрш. до 20 см дл., темно-коричневый, в коричневых чш.; сорусы небольшие, темно-коричневые, 1-1,5 мм, расположены ближе к краю л.п., иногда густо, но не у ц.ж.; индузий небольшой, чашевидный, по краям редко зубчатый.

*Polystichum luctuosum* (Kunze) T. Moore Л. дважды перистые, грубые, кожистые. Доли л.п. по краям нечасто зубчатые или пильчатые, каждый зубец заканчивается щетинкой. Индузии мелкие, узко-бокаловидные, часто высокие относительно спорангия, почти не прикрывают сорус; сорусы мелкие, округлые, темно-коричневые, 1 мм в диам., лежат по бокам от средней жилки, параллельно ей в два ряда с каждой стороны, по 5-8 сорусов на сегмент.

**Семейство Polypodiaceae**

*Drynaria quercifolia* (L.) J. Sm Л. перистые или перистораздельные без петельчатых чашечек. Жилкование сетчатое, с ВАЖ диморфные. Сегменты л.п. прилегают к рахису Стерильные л. специализированные, приспособленные для собирания гумуса, кожистые; обычные л. поникающие. Корневище не вздутое, без воздушных полостей. Спорангии собраны в овальные удлинённые сорусы

**Lepisorus macrosphaerus (Baker) Ching** Л. кожистые, чешуи с хорошо развитым склеренхимным тяжем; парафизы на верхушке щитовидные. Корневища 0.8-2 мм толщиной; чешуи 1-2 мм длиной. Чрш. более тонкие и длинные, 10-60 мм длиной и 0.4-0.8 мм толщиной, в 3-10 раз короче пластинки л. Произрастает на скалах, на камнях, пнях, стволах деревьев в смешанных и лиственных лесах.

**Phymatosorus pustulatus (G. Forst) Large Braggins, P.S. Green** Листья 40-45 см длину, 10-12 см шириной, перисторассеченные; доли линейно-ланцетные, кожистые, голые, темно-зеленые; сорусы относительно мелкие, расположены в 1 ряд ближе к краю листовой пластинки, округло-овальные, углубленные; поверхность листовой пластинки бугорчато-пупырчатая; корневище ползучее, с коричневатыми чешуями; в засушенном виде растение издает запах кумарина.

**Microsorium punctatum (L.) Copel** Л. перистые или перистораздельные без петельчатых чашечек. Сегменты л.п. без сочленения с рахисом Л. очень жесткие, узкоэллиптические, на коротких чрш. Крш. короткое, ползучее; **Phlebodium aureum L.** Л. перистораздельные, крупные (1 м и более), на длинных крепких чрш., далеко расставленные на толстом крш., густо покрыто крупными ланцетными, вытянуто-игольчатыми, реснитчатыми, золотисто-коричневыми чш.; сегменты л.п. широкие, цельнокрайние, гладкие; жилкование сетчатое, у ц.ж. – ряд узких ар. без ВАЖ, далее серия главных ар. с двумя ВАЖ, у края л. – маленькие ар. без ВАЖ; сорусы полусферические, без парафиз, по одному на каждой главной ар.

**Pyrrosia lingua (Thunb.) Farw** Л. широколанцетные, в основании довольно резко сужающиеся в хорошо выраженный б.м. узкий чрш. Споросных л. очень мало, не превышают 20 см в длину, темно-зеленые, сверху почти не опушены, снизу с желтовато-коричневым плотным опушением; боковые ж. хорошо заметны, сорусы выдающиеся, расположены чрезвычайно плотно между боковыми ж., в 4-6 рядов из 10-20 сорусов, цвета корицы

#### Семейство Pteridaceae

**Pteris cretica L.** Листья целиком однажды перистые, 15-35 см длиной и 10-25 см шириной; листочки супротивные, удлиненно-ланцетные до линейных, плотные и тонкие, голые, светло-зеленые, нижние рассечены на 2-3 длинные доли; стерильные листья шире фертильных, их края гранено-зубчатые; черешок прямой или слабо согнутый, соломенно-желтый или светло-коричневый. Часто боковые листья подразделяются на более или менее линейные доли. Боковых листочков 6 или меньше; рахис не крылатый. Боковых сегментов 2-4, редко 6. В коллекции представлены культивары *P. cretica* “Albo-lineata” и “Alexandrae”.

**Pteris longifolia L.** Листья строго однажды перистые, с 20-30 парами листочков, в общих очертаниях широколинейные, 30-70 см длиной, 10-20 см шириной; листочки линейно-ланцетные, цельные, на вершине заостренные, голые, плотные, цельнокрайние, равномерно на рахисе расположенные, 10-15 см длиной; черешок прямой, желтовато-зеленый, с короткими чш. линейной формы, 15-20 см длиной.

#### Семейство Schizaeaceae

**Lygodium japonicum (Thunb.) Sw. Show** Стерильные листья дважды-трижды перистые, их сегменты 1 порядка пальчато- или тройчато-рассеченные на удлиненные сегменты, из которых средний – наиболее длинный; фертильные листья мелкие, дольчато-зубчатые.

Таблица 2 – Морфологические параметры представителей отдела Папоротникообразные коллекции ЮУБСИ УФИЦ РАН

Название	длина листа, см	длина листочка, см	длина черешка, см	длина рахиса, см	кол-во листьев, шт	сорусы
Семейство <i>Adiantaceae</i>						
<i>Adiantum capillus-veneris</i> (грунт)	8,0-45,0	2,0-9,0	22,0-28,0	3,7-49,0	24	да
<i>Adiantum capillus-veneris</i> (контейнер)	17,0-36,0	4,0-7,0	14,0-16,0	7,0-18,0	18	да
<i>Adiantum hispidulum</i>	4,5-9,0	1,0-2,0	1,5-2,0	1,5-3,0	12	да
<i>Adiantum caudatum</i>	2,5-29,0	1,7-4,0	1,7-4,0	2,0-20,0	17	да
Семейство <i>Aspleniaceae</i>						
<i>Asplenium bulbiferum</i>	3,0-24,0	2,0-16,0	3,0-9,0	2,0-16,0	4	бульбы
<i>Asplenium nidus-avis</i>	7,0-23,0	6,0-17,0	1,0-12,0	6,0-16,0	34	да
<i>Asplenium viviparum</i> (контейнер)	32,0-51,0	3,0-10,0	5,0-12,0	25,0-38,0	14	да
<i>Asplenium viviparum</i> (грунт)	19,0-98,0	3,0-15,0	6,0-32,0	19,0-41,0	29	да
Семейство <i>Blechnaceae</i>						
<i>Blechnum gibbum</i>	7,0-21,0	1,0-2,0	2,0-8,0	4,0-8,0	4	да
Семейство <i>Davalliaceae</i>						
<i>Davallia canariensis</i>	39,0-63,0	2,0-12,0	9,0-17,0	13,0-39,0	18	да
<i>Humata pyxidata</i>	31,0-54,0	2,0-16,0	14,0-22,0	15,0-33,0	9	да
Семейство <i>Dryopteridaceae</i>						
<i>Cyrtomium falcatum</i> (контейнер)	24,0-64,0	5,0-11,0	8,0-18,0	13,0-40,0	21	да
<i>Cyrtomium falcatum</i> (грунт)	40,0-92,0	6,0-13,0	22,0-28,0	3,7-49,0	24	да

Окончание табл. 2 – Морфологические параметры представителей отдела Папоротникообразные коллекции ЮУБСИ УФИЦ РАН

Название	длина листа, см	длина листочка, см	длина черешка, см	длина рахиса, см	кол-во листьев, шт	сорусы
<i>Polystichum luctuosum</i>	4,0-7,5	1,2-2,0	2,2-3,0	3,0-5,0	9	нет
Семейство <i>Polypodiaceae</i>						
<i>Drynaria quercifolia</i>	38,0-45,0	5,0-9,0	20,0-27,0	12,0-23,0	2	да
<i>Lepisorus macrosphaerus</i>	8,0-36,0	6,0-32,0	2,0-4,0		11	да
<i>Microsorium punctatum</i>	20,0-38,0	19,0-30,0	0,5-2,0		20	да
<i>Phlebodium aureum</i>	90,0-116,0	10,0-27,0	30,0-45,0	31,0-46,0	5	да
<i>Pyrrosia lingua</i>	24,0-42,0	23,0-29,0	4,0-15,0	2,7-15,0	31	да
Семейство <i>Pteridaceae</i>						
<i>Pteris cretica</i>	27,0-90,0	4,5-30,0	7,0-59,0	9,0-24,0	40	да
<i>Pteris cretica</i> 'Albo-Lineata'	1,2-9,0	2,0-8,0	6,0-21,0	3,0-11,0	20	да
<i>Pteris cretica</i> 'Alexandrae'	24,0-80,0	5,0-21,0	9,0-31,0	6,0-15,0	47	да
<i>Pteris longifolia</i> (грунт)	19,0-89,0	1,5-14,0	5,0-9,0	19,0-60,0	20	да
<i>Pteris longifolia</i> (контейнер)	40,0-52,0	2,0-6,0	5,0-7,0	34,0-42,0	4	да
<i>Pteris cretica</i> cv. <i>gaultrichii</i>	40,0-16,0	2,0-7,0	2,0-5,0	1,0-7,0	35	
Семейство <i>Nephrolepidaceae</i>						
<i>Nephrolepis cordifolia</i>	30,0-34,0	0,5-1,5	1,0-8,0	4,0-29,0	25	нет
<i>Nephrolepis exaltata</i> (контейнер)	27,0-93,0	1,5-3,0	6,0-12	19,0-82,0	33	да
<i>Nephrolepis exaltata</i> (грунт)	19,0-94,0	1,0-3,0	6,0-11,0	12,0-73,0	52	
Семейство <i>Schizaeaceae</i>						
<i>Lygodium japonicum</i>	17,0-27,0	3,0-4,5	4,0-10,0	3,0-6,0	11	нет

Сравнительный анализ показал, что виды умеренного и субтропического пояса достигают в условиях оранжереи размеров, аналогичных природным. В отличие от них, папоротникообразные тропических флор характеризуются меньшими размерами. Однако, почти для всех видов отмечено спороношение и образование приспособлений для вегетативного размножения, что свидетельствует о достаточно успешном развитии в интродукционных условиях.

Сведения о морфологии и габитуальных показателях в условиях оранжереи позволяют выделить функциональные группы видов для целей интерьерного озеленения. К первой (крупные цельные или перистые вайи более 50 см, наземная форма роста) отнесены виды рода Птерис, Циртомиум серповидный, Асплениум живородящий и др., а также крупные эпифитные виды Флебодиум золотистый, Пиррозия язычковая. Могут использоваться как солитеры, в групповых композициях, для оформления нижнего яруса древесно-кустарниковых композиций в зимних садах. Ко второй (небольших размеров, с перистыми листьями, эпифитные общей высотой не более 30 см) отнесены виды рода Адиантум, Многорядник печальный. Они могут применяться для создания композиций в настольных флорариумах, одиночных горшечных посадок для декорирования интерьерных микрозон. К третьей отнесены эпифитные виды, такие как Платицерум дваждывилчатый, виды рода Даваллия, Нефролепис, которые перспективны для различных форм вертикального озеленения интерьеров (зеленых стен и зеленых картин, подвесных корзин). Для этих целей в будущем можно будет рекомендовать и виды-лианы Стенохлена болотная и Лигодиум японский, при условии их успешного развития в условиях оранжереи.

Вовлечение материалов коллекции папоротникообразных в образовательную деятельность возможно на разных этапах и для различных возрастных групп [11]. Так, для учащихся начальной школы папоротники различных областей земного шара демонстрируют разнообразие местообитаний, освоенных растениями, и широту географического распространения. В средних и старших классах растения коллекции могут служить объектами для изучения процессов полового и вегетативного размножения, разнообразия жизненных форм, при характеристике полезных свойств растений. Экологические экспозиции оранжереи «Декоративный водопад» и «Рутарий» могут продемонстрировать папоротники как компонент растительных сообществ специфических местообитаний. На примере эпифитных папоротников можно наглядно продемонстрировать приспособления растений к накоплению воды и гумуса в условиях тропического леса (воронки и стерильные листья). Для студентов-биологов упомянутые понятия и явления могут быть раскрыты на более высоком научном уровне, в рамках лабораторных занятий по проращиванию спор и работы с гербарными образцами. Могут быть сформированы представления об эволюционных тенденциях как отдельной систематической группы, так и всего царства растений. Для студентов-дизайнеров (направления «ландшафтный дизайн», «фитодизайн», «дизайн интерьеров») папоротники коллекции являются объектами, на которых можно изучить декоративные свойства растений, правила составления растительных композиций с акцентом на теневыносливость данной группы и неприхотливость ряда видов в условиях интерьерного озеленения.

## Конфликт интересов

Не указан.

## Conflict of Interest

None declared.

## Список литературы / References

1. Арнаутова Е.М. Стратегия комплектования и экспонирования ботанических коллекций в современных условиях / Арнаутова Е.М. // Биологическое разнообразие. Интродукция растений Материалы Шестой Международной научной конференции 20-25 июня 2016 г., Санкт-Петербург, Россия. С.3-5
2. Лебедева М.В. Древесные растения флоры Восточной и Юго-Восточной Азии в оранжерее Ботанического сада-института УНЦ РАН / Лебедева М.В., Кашаева Г.Г., Якупова В.В. // Бюллетень ГБС. – 2017. – №3 (203). – С. 8-13.
3. Шумихин С.А. Эколого-экспозиционный комплекс ботанического сада Пермского государственного университета / Шумихин С.А., Сарана Д.В. // Труды Томского государственного университета. – 2010. – Том 274. Серия биологическая. – С.442-445.
4. Храпко О.В. Биологические и морфологические адаптации лесных дальневосточных папоротников / О.В. Храпко // Вестник ТвГУ. Сер. Биология и экология. – 2017. – №2. – С. 230-243.
5. Воронин А.А. Эколого-биологические особенности папоротниковидных региональной флоры при интродукции в ботаническом саду им. проф. Б. М. Козо-Полянского Воронежского госуниверситета / А.А.Воронин, В.И. Серикова, Б.И. Кузнецов // Самарский научный вестник. – 2015. – №1(10). – С. 51-55.
6. Жизнь растений : в 6 т. / гл. ред. Ал. А. Фёдоров. — М. : Просвещение, 1978. — Т. 4 : Мхи. Плауны. Хвощи. Папоротники. Голосеменные растения / под ред. И. В. Грушвицкого и С. Г. Жилина. — 447 с.
7. Species 2000 & ITIS Catalogue of Life, 22nd March 2017. Species 2000: Naturalis, Leiden, the Netherlands. [Электронный ресурс]. URL: [www.catalogueoflife.org/col](http://www.catalogueoflife.org/col). [дата обращения: 20 сентября 2019]
8. The Plant List, 2013. Version 1.1; [Электронный ресурс]. URL: <http://www.theplantlist.org> (дата обращения: 20 сентября 2010)
9. GBIF.org (2019), *GBIF Home Page*. [Электронный ресурс]. Available URL: <https://www.gbif.org> (дата обращения: 20 сентября 2019)
10. Patrick J. Minogue Japanese Climbing Fern (*Lygodium japonicum*) Management in Florida's Apalachicola Bottomland Hardwood Forests / P. J. Minogue, K. K. Bohn, A. Osiecka, and D. K. Lauer // *Invasive Plant Science and Management* – 2010. – № 3(3). – P. 246-252. <https://doi.org/10.1614/IPSM-D-09-00023.1>
11. Скулкин И. М. Краткий определитель папоротников закрытого грунта / И. М. Скулкин. – Екатеринбург: Урал. Гос. Пед. Ун-т, 1996 – 118 с.
12. Шмаков А.И. Определитель папоротников России / А.И. Шмаков. – Барнаул: Изд-во АГУ, 1999 – 126 с.
13. X.-P. Qi, X.-Ch. Zhang Taxonomic revision of *Lepisorus* (J. Sm.) Ching sect. *Lepisorus* (Polypodiaceae) from China // *Journal of Systematics and Evolution* 47 (6): 581–598 (2009) doi: 10.1111/j.1759-6831.2009.00056.x
14. Храпко О. В. Папоротники как объекты для изучения в цепи непрерывного экологического образования / О. В. Храпко, М. В. Касинцева, Е. В. Меделян // *Известия Иркутского государственного университета*. – 2011. – Т. 4. – №2. – С. 109–112.

## Список литературы на английском языке / References in English

- 1 Arnautova E.M. Strategija komplektovaniya i jeksponirovaniya botanicheskikh kollekcij v sovremennykh usloviyah [Strategy for Picking and Exposure of Botanical Collections in Modern Conditions] / Arnautova E.M. // *Biologicheskoe raznoobrazie. Introdukciya rastenij: Materialy Shestoij Mezhdunarodnoj nauchnoj konferenciji 20-25 ijunya 2016 g., Sankt-Peterburg* [Biodiversity. Introduction of plants: Materials of 6th international scientific conference 20-25 June 2016, Saint-Petersburg] – Saint-Petersburg. –2016. – P.3-5. [in Russian]
- 2 Lebedeva M.V. Drevesnye rastenija flory Vostochnoj i Jugo-Vostochnoj Azii v oranzheree Botanicheskogo sada-instituta UNC RAN [Forest plants of flora of East and South-East Asia in the greenhouse of the Botanical Garden-Institute of UNC RAS]/Lebedeva M.V., Kashaeva G.G., Jakupova V.V. //Bjulleten' GBS [Bulletin of MBG]. – 2017. – №3 (203). – P. 8-13. [in Russian]
- 3 Shumihin S.A. Jekologo-jekspozicionnyj kompleks botanicheskogo sada Permskogo gosudarstvennogo universiteta [Ecological Exposition Complex of Botanical Garden of Perm State University]/ Shumihin S.A., Sarana D.V. // *Trudy Tomskogo gosudarstvennogo universiteta* [Works of Tomsky State University]. – 2010. – V. 274. Serija biologicheskaja. – P.442-445. [in Russian]
- 4 Khrapko, O. V. Biologicheskije imorfologicheskije adaptacii lesnich dalnevostochnich paporotnikov [Biological and morphological adaptation of the far Eastern forest ferns] / Khrapko, O. V. // *VestnikTvgu. SeriaBiologia I ecologia* [Vestnik of Tver state University. Ser. Biology and ecology]. - 2017. - No. 2. P. 230-243.[in Russian]
- 5 Voronin A. A. Ecologo-biologicheskije osobennosti paporotnicovidnih regionalnoi flori prii ntrodukcii v botanicheskom saduim. Prof. B. M. Kozo-Polyanskogo Voronezskogo gosuniversiteta [Ecological and biological features of fern-like regional flora during introduction in the Botanical garden. Prof. B. M. Kozo-Polyansky Voronezh state University] / A. A. Voronin, V. I. Serikova, B. I. Kuznetsov // *Samarskii nauchnii vestnik* [Samara scientific Bulletin]. - 2015. - No. 1 (10). P. 51-55. [in Russian]
- 6 Zhizn' rastenij [Life of plants] : V. 6 . edit. Al. A. Fjodorov. — M. : Prosveshhenie, 1978. — V. 4 : Mhi. Plauny. Hvoshhi. Paporotniki. Golosemennye rastenija [Mosses. Horsetails. Ferns. Gymnospermous plants] / edited by I. V. Grushvickogo i S. G. Zhilina. — 447 p. [in Russian]
- 7 Species 2000 & ITIS Catalogue of Life, 22nd March 2017. Species 2000: Naturalis, Leiden, the Netherlands. [Electronic resource]. URL: [www.catalogueoflife.org/col](http://www.catalogueoflife.org/col). (accessed: 20.09.2019)
- 8 The Plant List, 2013. Version 1.1; [Electronic resource]. URL: <http://www.theplantlist.org> (accessed: 20.09.2019)
- 9 GBIF.org (2019), *GBIF Home Page*. [Electronic resource]. URL: <https://www.gbif.org> (accessed: 20.09.2019)
- 10 Patrick J. Minogue Japanese Climbing Fern (*Lygodium japonicum*) Management in Florida's Apalachicola Bottomland Hardwood Forests / P. J. Minogue, K. K. Bohn, A. Osiecka, and D. K. Lauer // *Invasive Plant Science and Management* – 2010. – № 3(3). – P. 246-252. <https://doi.org/10.1614/IPSM-D-09-00023.1>
- 11 Skulkin I. M. Kratkii opredelitel paporotnikov zakritogo grunta [Brief determinant of ferns of the closed ground] / I. M. Skulkin. - Yekaterinburg: Ural. State. Univ, 1996 – 118 p. [in Russian]
- 12 Shmakov A. I. Opredelitel paporotnikov Rossii [The manual of the ferns of Russia] / A. I. Shmakov. - Barnaul: Publishing house of ASU, 1999 - 126 p. [in Russian]
- 13 X.-P. Qi, X.-Ch. Zhang Taxonomic revision of *Lepisorus* (J. Sm.) Ching sect. *Lepisorus* (Polypodiaceae) from China // *Journal of Systematics and Evolution* 47 (6): 581–598 (2009) doi: 10.1111/j.1759-6831.2009.00056.x
- 14 Khrapko O. V. Paporotniki kako bekti dlya izuchenia v cepi neprerivnogo ecologicheskogo obrazovania [Ferns as objects for studying in the chain of continuous ecological education] / O. V. Khrapko, M. V. Kasintseva, E. V. Medelyan // *Izvestia Irkutskogo gosudarstvennogo institute* [Izvestiya Irkutsk state University]. - 2011. - V. 4. - No. 2. P. 109-112.[in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.90.12.035>

## МОРФОЛОГО-ГЕНЕТИЧЕСКАЯ СПЕЦИФИКА ПОЧВ ОСТРОВА УРУП

Научная статья

**Полохин О.В. \***

ORCID: 0000-0002-5519-5808,

Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН, Владивосток, Россия

\* Корреспондирующий автор (o.polokhin[at]mail.ru)

### Аннотация

Представлены результаты диагностики и определения классификационного положения почв, которые расположены в центральной части острова Уруп с использованием профилно-генетического подхода. Изучаемые почвы были сформированы на прибрежной и склоновой территории острова. Дана морфологическая, физическая и физико-химическая характеристика исследуемых профилей почв. Выявлено, что почвы на крутом склоне являются полигенетичными образованиями, но не относятся к слоистым типам почв. Почвы по гранулометрическому составу легкие. Установлено уменьшение содержания вглубь по профилю оксида кремния с одновременным увеличением в 1,5-2 раза количества полуторных оксидов. Почвы, развитые на отрезке морской террасы являются слоистыми. Сделано предположение, что на физико-химические свойства оказывают влияние не только растительные ассоциации, невысокое количество органического углерода, но и в значительной степени близость к слабощелочным водам Охотского моря.

**Ключевые слова:** морфология почв, диагностические горизонты, Уруп, Курильские острова.

## MORPHOLOGICAL AND GENETIC FEATURES OF SOILS IN URUP ISLAND

Research article

**Polokhin O.V. \***

ORCID: 0000-0002-5519-5808,

Federal Scientific Center for Biodiversity of Terrestrial Biota of East Asia FEB RAS, Vladivostok, Russia

\* Corresponding author (o.polokhin[at]mail.ru)

### Abstract

The paper presents the results of diagnostics and determination of the classification position of soils, which are located in the central part of Urup Island using the profile-genetic approach. The studied soils were formed on the coastal and slope areas of the island. The morphological, physical, and physicochemical characteristics of the studied soil profiles are provided as well. It was revealed that soils on a steep slope are polygenetic formations, but do not belong to layered soil types. The soils are light in terms of particle size distribution. A decrease was found in the content in depth along the profile of silicon oxide with a simultaneous increase of 1.5-2 times the number of one and a half oxides. The soils developed on the stretch of the sea terrace are layered. It was suggested that the physicochemical properties are influenced not only by plant associations, a low amount of organic carbon, but also largely by proximity to the slightly alkaline waters of the Sea of Okhotsk.

**Keywords:** soil morphology, diagnostic horizons, Urup, Kuril Islands.

Почвенный покров Курильских островов исследован недостаточно и фрагментарно [1], [2], [3]. Это обусловлено малодоступностью островов, плохими погодными условиями и малонаселенностью крупных островов Курильской гряды [4]. Исследователи островных почв указывают, что педогенные процессы не отличаются от материковых [5]. Тем не менее, существует специфика процессов островного почвообразования [6], [7], [8]. Целью работы являлось исследование главных морфолого-генетических и связанных с ними иных свойств вулканических почв острова Уруп.

Исследования были проведены в первой декаде августа 2015 года в районе рейда Открытый о. Уруп (охотоморская сторона острова). Уруп входит в число крупных островов Курил и является результатом вулканической деятельности [9]. Для выполнения поставленных задач были выбраны участки на прибрежной и склоновой территории острова. С целью описания микрорельефа, растительности и сбора гербарных образцов отмежеваны пробные площади 10x10м. Внутри этих площадок заложены почвенные разрезы для морфологического описания почв и отбора образцов на камеральные исследования. Первый участок располагался на прибрежной территории представляющей собой морскую террасу. Вторым выбран на склоне, примыкающем к озеру Токотан. Заложение почвенных разрезов, описание почвенных профилей и отбор образцов выполнялись по принятым программам и методикам [10], [11], [12]. Валовой состав почвенных образцов определялся на рентгенофлуорисцентном спектрометре Shimadzu EDX 800 (Япония). Анализ проведен в Центре коллективного пользования «Биотехнология и генетическая инженерия» ФНЦ биоразнообразия ДВО РАН. Названия растений приведены по сводке [13].

Преобладающим рельефом на Урупе является вулкано-тектонический [6]. Среди основных ландшафтов выделяются средне и крутосклоновые, а также ландшафты отрицательных форм рельефа, таких как балки. Вдоль берега моря часто находятся песчаные холмы (дюны) мелко и средне песчаного состава. Гигрографическая сеть в районе исследования включает в себя кроме ручьев одну из наиболее крупных на острове рек Токотан и озеро с таким же названием [6].

Климат на острове типично морской. Это климат с летними и зимними невысокими температурами, значительным количеством осадков (до 1230 мм/год), основная часть которых приходится на теплое время года. Среди островов Курильской гряды на Урупе самое высокое количество туманных дней (до 215) [6].

Ряд исследователей причисляют о. Уруп по ботанико-географическому районированию к Урупскому флористическому району Южно-Курильского округа Сахалино-Хоккайдской провинции Восточноазиатской флористической области [14]. При этом необходимо отметить, что центральная часть острова, где проводились исследования, была наименее изучена. Преобладают леса с березой каменной и стланиками (ольховым и кедровым). Лесистость острова до 50% [14]. Значительные площади занимают бамбучник и разнотравье [3].

Почвенный покров о. Уруп рассмотрен в Атласе Курильских островов [8]. Авторы главы «Почвы» включили территорию о. Уруп в Сихотэ-Алинско-Сахалинскую провинцию, Среднекурильский округ, Урупский район [7], [8]. При этом главными типами почв определены охристые типичные, а также охристо-подзолистые и сухоторфяные океанические.

Участок Р У 1-15 (45°51'38"С 149°47'45"В) находится на юго-западный крутом (30-35°) склоне г. Рудакова, около 500 м от рейда Открытый. Нижней частью склон примыкает к озеру Токотан. Склон расчленяется балками, сложен эффузивными светло-серыми породами основного и среднего состава [6], [9]. В древесном ярусе преобладает береза Эрмана. Кустарниковый ярус слагают стланник кедровый и рябина бузинолистная. В подлеске курильский бамбук и разнотравье (аспект создавали *Filipendula camtschatica* (Pall) Maxim.). Проективное покрытие до 100%.

Морфологическое описание профиля почвы заложенного разреза на этом участке.

АО 0-1 см опад

Адн 1-7 см дернина, упругая, состоит из живых и мертвых плохо разложившихся корней, однородно буровато-темно-серый, сырой, мажется, рыхлый, непрочный-мелко-комковатый, легко суглинистый, граница волнистая, переход к следующему горизонту ясный по цвету и плотности.

ВН 7-22 см серый с бурым оттенком, влажный, непрочно-комковато порошистый, рыхлый, плотность выше, чем у вышележащего горизонта, включение обломков исходных пород, корней много, переход заметный, граница волнистая.

2А 22-40 см темно-бурый неоднородный, влажный, включения обломков материала исходных пород, много живых корней, переход заметный, граница волнистая.

2ВН 40-65 см темно-бурый с рыжеватым оттенком неоднородный, темнее предыдущего, мокрый, включения обломков исходных пород.

Обломки материала исходных пород, переходящие в массив приводят к невозможности углубления разреза.

Почва дерново-перегнойная среднemosшная охристая вулканическая.

Существование погребенных горизонтов дает нам возможность считать данную почву полигенетичной. При этом наблюдаемые всего два элементарных профиля, один из которых является погребенным, не позволяют отнести почвы к слоисто-охристу подтипу вулканических почв. Плотность сложения увеличивается в глубину (табл.). В связи с высоким содержанием органического вещества, по плотности сложения достигаются значения характерные для вспушенных почв. Следует отметить, что горизонт, расположенный на глубине 22-40 см, имеет промежуточное значение плотности сложения по сравнению с выше и ниже расположенными. Это может также служить одним из показателей доказательства полигенетичности профиля. О полигенетичности почвы свидетельствуют и величины потери при прокаливании, и в определенной степени значения рН выделенных горизонтов (табл.). Так в погребенных горизонтах потери при прокаливании в три раза выше, чем в горизонте ВН. Поскольку потери при прокаливании в некарбонатных почвах включают гумус и химически связанную воду, то это является доказательством захоронения именно гумусового горизонта.

Плотность сложения горизонта 2А меньше чем у предыдущего и последующего горизонтов (табл.). Степень каменистости резко увеличивается вниз по профилю от среднекаменистой (6-9%) до сильнокаменистой (до 40%). Почвы относим к охристым не только по морфологическим признакам, но и по уменьшению содержания оксида кремния с глубиной (74% в верхнем горизонте, 53-54% в погребенных) с увеличением в 1,5-2 раза количества полуторных оксидов ( $Al_2O_3$  с 8% до 23%,  $Fe_2O_3$  с 7,4% до 14%).

Почва относится к кислым, о чем свидетельствуют низкие значения рНводн. (табл.).

Участок Р У 2-15 (45°51'35"С 149°47'8"В). Расположен на отрезке морской террасы шириной около 25 м, высотой 4-4,5 м, в пределах 90 м от береговой линии. Из кустарников обычен шиповник морщинистый. Травянистый покров состоит из колосняка мягкого с включениями полыни арктической и Стеллера, сазы курильской, вейника Лангсдорфа, осоки крупно- и скрытоплодной, термописа люпиновидного. Почвы, развитие под растительностью имеют следующее строение:

АО 0-1 см опад

Ада 1-46 см темно-серый, неоднородно слоистый, много корней, песчаный, влажный, уплотненный, присутствие вулканического стекла черного цвета, граница слабоволнистая, переход заметный как по цвету, так и плотности.

АВ 46-78 см светлее предыдущего, неоднородный от серого до темно-серого, песчаный, включения темного вулканического стекла, влажный, плотнее вышерасположенного.

Почва дерновая слоисто-песчаная вулканическая.

По значениям плотности сложения почва может быть отнесена к уплотненным (табл.).

Таблица 1 – Физические и физико-химические свойства вулканических почв о. Уруп

Горизонт, глубина (см)	Плотность сложения, г/см <sup>3</sup>	Потери при прокаливании, %	pHводн.
<b>Дерново-перегнойная среднemocная охристая вулканическая</b>			
Адн 1-7	0,38	30,7	5,05
ВН 7-22	0,72	13,9	4,91
2А 22-40	0,66	40,7	4,75
2 ВН40-60	0,88	41,6	4,82
<b>Дерновая слоисто песчаная мощная вулканическая</b>			
АдА 1-5	1,20	3,4	6,58
АдА <sub>1</sub> 5-10	1,24	3,3	6,72
АдА <sub>2</sub> 10-15	1,28	3,0	6,79
АдА <sub>3</sub> 40-45	1,64	2,4	6,28
АВ <sub>1-4</sub> 5-70	1,53	1,9	6,45

На данный показатель влияет высокое содержание песчаных фракций в гранулометрическом составе и малое количество органического углерода, об этом свидетельствуют невысокие показатели потерь при прокаливании.

По кислотно-основным свойствам верхние горизонты (до глубины 15 см) относятся к нейтральным. На глубине ниже 15 см значения pHводн. понижаются до слабoкислых величин (табл.). Полагаем, что на почвы морской террасы значительное влияние оказывает близость к водам Охотского моря со значениями водного pH около 8.

Таким образом, в ходе изучения профилей двух типов почв о. Уруп можно сделать следующие предварительные выводы:

Почвы на крутом склоне являются полигенетичными образованиями.

Стоит отметить, что при этом они не могут относиться к слоистым, так как имеют всего два элементарных профиля, из которых только один является погребенным. Почвы по гранулометрическому составу легкие. Считаем, что данные почвы можно отнести к типу охристых почв. Это подтверждается не только морфологическими признаками, но и уменьшением содержания оксида кремния с глубиной с одновременным увеличением в 1,5-2 раза количества полуторных оксидов.

Почвы, развитые на отрезке морской террасы имеют в профиле множественные слои, которые различаются по морфолого-генетическим признакам. На физико-химические свойства оказывают влияние не только растительные ассоциации, невысокое количество органического углерода, но и в значительной степени близость к слабощелочным водам Охотского моря.

#### Конфликт интересов

Не указан.

#### Conflict of Interest

None declared.

#### Список литературы / References

1. Гладкова Г.А. Лесные вулканические почвы острова Кунашир / Г.А. Гладкова, Г.Н.Бутовец// Почвоведение. – 1988. – №2. – С.54-67.
2. Гришин С.Ю. Воздействие извержения вулкана Алаид (Курильские острова) в 1972 г. на экосистемы/С.Ю. Гришин, А.Н. Яковлева, С.А. Шляхов//Вулканология и сейсмология. – 2009. – № 4. – С. 30-43.
3. Гришин С.Ю. Растительность и почвы острова Парамушир/С.Ю. Гришин, С.А. Шляхов//География и природные ресурсы. – 2008. – № 4. – С. 96-103.
4. Полохин О.В. Почвенный и растительный покров острова Итуруп (Курильские острова) /О.В. Полохин, Л.А. Сибирина// Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5. – С. 618.
5. Полохин О.В. Почвы и растительность острова Симушир (Курильские острова) /О.В. Полохин, Л.А. Сибирина//Фундаментальные исследования. – 2013. – № 10 (часть 8). – С. 1766-1769.
6. Ганзей К.С. Ландшафты и физико-географическое районирование Курильских островов: дис. ... канд. геогр. наук. – Владивосток, 2009. – 161 с.
7. Костенков Н.М. Почвенно-географическое районирование Курильских островов /Н.М. Костенков, В.И. Ознобихин//Вестник СВНЦ ДВО РАН. – 2011. – №1. – С.77-83.
8. Костенков Н.М. Почвы /Н.М. Костенков, В.И. Ознобихин, С.А. Шляхов// Атлас Курильских островов. – М.: ИВЦ «ДИК», 2009. – С. 61-68.
9. Горшков Г.С. Вулканизм Курильской островной дуги /Г.С. Горшков. – М.: Наука, 1967. – 287 с.
10. Рагимов, А. О. Почвоведение : лаб. практикум / А. О. Рагимов, М. А. Мазиров, Е. М. Шентерова ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2017. – 120 с
11. Розанов, Б.Г. Генетическая морфология почв /Б.Г. Розанов. – М., Изд-во МГУ, 1975. – 284 с.
12. Сорокина Г.А. Учебная полевая практика по геоботанике /Г.А. Сорокина, Н.В. Пахарькава, Т.Л. Шашкова, и др. //Учебно-методическое пособие. — Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012. — 30 с.
13. Сосудистые растения советского Дальнего Востока. – СПб.: Наука, 1985-1996. Т. 1-8.
14. Баркалов В.Ю. Флора Курильских островов / В.Ю. Баркалов. – Владивосток: Дальнаука, 2009. – 468 с.

**Список литературы на английском языке / References in English**

1. Gladkova G.A. Lesnye vulkanicheskie pochvy ostrova Kunashir [Forest volcanic soils of Kunashir island] / G.A. Gladkova, G.N. Butovec // Pochvovedenie. – 1988. – №2. – P.54-67. [in Russian]
2. Grishin S.Ju. Vozdejstvie izverzhenija vulkana Alaid (Kuril'skie ostrova) v 1972 g. na jekosistemy [Impact of the eruption of the volcano Alaid (Kuril Islands) in 1972 on ecosystems] / S.Ju. Grishin, A.N. Jakovleva, S.A. Shljahov // Vulkanologija i sejsmologija. – 2009. – № 4. – P. 30-43. [in Russian]
3. Grishin S.Ju. Rastitel'nost' i pochvy ostrova Paramushir [Vegetation and soils of Paramushir island] / S.Ju. Grishin, S.A. Shljahov // Geografija i prirodnye resursy. – 2008. – № 4. – P. 96-103. [in Russian]
4. Polohin O.V. Pochvennyj i rastitel'nyj pokrov ostrova Iturup (Kuril'skie ostrova) [Soil and vegetation cover of Iturup island (Kuril Islands)] / O.V. Polohin, L.A. Sibirina // Sovremennye problemy nauki i obrazovanija. – 2014. – № 5. – P. 618. [in Russian]
5. Polohin O.V. Pochvy i rastitel'nost' ostrova Simushir (Kuril'skie ostrova) [Soil and vegetation of Simushir island (Kuril Islands)] / O.V. Polohin, L.A. Sibirina // Fundamental'nye issledovanija. – 2013. – № 10 (chast' 8). – P. 1766-1769. [in Russian]
6. Ganzej K.S. Landshafty i fiziko-geograficheskoe rajonirovanie Kuril'skih ostrovov [Landscapes and physico-geographical zoning of the Kuril Islands]: dis. ... kand. geogr. nauk. – Vladivostok, – 2009. – 161 pp. [in Russian]
7. Kostenkov N.M. Pochvenno-geograficheskoe rajonirovanie Kuril'skih ostrovov [Soil and geographical zoning of the Kuril Islands] / N.M. Kostenkov, V.I. Oznobihin // Vestnik SVNC DVO RAN. – 2011. – №1. – P.77-83. [in Russian]
8. Kostenkov N.M. Pochvy [Soil] / N.M. Kostenkov, V.I. Oznobihin, S.A. Shljahov // Atlas Kuril'skih ostrovov. – M.: IVC «DIK», – 2009. – P. 61-68. [in Russian]
9. Gorshkov G.S. Vulkanizm Kuril'skoj ostrovnnoj dugi [Volcanism of the Kuril island arc] / G.S. Gorshkov. – M.: Nauka, – 1967. – 287 pp. [in Russian]
10. Ragimov, A. O. Pochvovedenie : lab. praktikum [Soil science: lab. Workshop] / A. O. Ragimov, M. A. Mazirov, E. M. Shenterova ; Vladim. gos. un-t im. A. G. i N. G. Stoletovyh. – Vladimir : publishing house VIGU, – 2017. – 120 pp. [in Russian]
11. Rozanov B.G. Geneticheskaja morfologija pochv [Genetic morphology of soils] / B.G. Rozanov. – M., publishing house MGU, 1– 975. – 284 pp. [in Russian]
12. Sorokina G.A. Uchebnaja polevaja praktika po geobotanike [Educational field practice in geobotany] / G.A. Sorokina, N.V. Pahar'kava, T.L. Shashkova et al // Uchebno-metodicheskoe posobie. — Krasnojarsk: Sib. feder. un-t, – 2012. — 30 pp. [in Russian]
13. Sosudistye rastenija sovetskogo Dalnego Vostoka. [Vascular plants of the Soviet Far East]. St. Petersburg, Nauka, – 1985–1996. – Vol. 1–8. [in Russian]
14. Barkalov V.Ju. Flora Kuril'skih ostrovov [Flora of the Kuril Islands] / V.Ju. Barkalov. – Vladivostok: Dal'nauka, – 2009. – 468 p. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.90.12.036>

## ПСИХРОТРОФНЫЕ МИКРООРГАНИЗМЫ ПОЧВ ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА

Научная статья

Сидоренко М.Л.<sup>1,\*</sup>, Слепцова Н.А.<sup>2</sup>, Немченко Ю.К.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ORCID: 0000-0003-2008-3029;

<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-4226-1984;

<sup>1,2</sup> ФНЦ Биоразнообразия наземной биоты восточной Азии ДВО РАН Владивосток, Россия;

<sup>3</sup> Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

\* Корреспондирующий автор (sidrenko[at]biosoil.ru)

### Аннотация

Из почв Дальневосточного региона России (Сахалин, Якутия, Еврейская автономная область, Амурская область, Магадан, о. Итуруп, Камчатка) выделены 70 психротрофных изолятов микроорганизмов. В результате скрининга выделенных изолятов на наличие ферментативной активности (амилазной, протеазной и липазной) установлено, что всеми тремя активностями обладают три изолята, выделенные из почв о. Итуруп и Якутии. Две из трех активностей показали 16 изолятов. Таким образом, наиболее перспективными являются 21 изолят, которые были введены в коллекцию для дальнейшего изучения.

**Ключевые слова:** психротрофные микроорганизмы, почвы, Дальний восток, ферменты, амилаза, протеаза, липаза.

## PSYCHROTROPHIC MICROORGANISMS OF THE FAR EAST SOILS

Research article

Sidorenko M.L.<sup>1,\*</sup>, Sleptsova N.A.<sup>2</sup>, Nemchenko Yu.K.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ORCID: 0000-0003-2008-3029;

<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-4226-1984;

<sup>1,2</sup> Federal Research Center for Biodiversity of Terrestrial Biota in Eastern Asia, FEB RAS, Vladivostok, Russia;

<sup>3</sup> Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

\* Corresponding author (sidrenko[at]biosoil.ru)

### Abstract

70 psychrotrophic isolates of microorganisms were isolated from the soils of the Far Eastern region of Russia (Sakhalin, Yakutia, the Jewish Autonomous Region, Amur Region, Magadan, Iturup Island, Kamchatka). It was established that three isolates taken from the soils of I. Iturup and Yakutia have all three activities as a result of the screening of these isolated isolates for the presence of enzymatic activity (amylase, protease, and lipase). Two of the three activities showed 16 isolates. Thus, 21 isolates, which were introduced into the collection for further study, are the most promising ones.

**Keywords:** psychrotrophic microorganisms, soils, Far East, enzymes, amylase, protease, lipase.

### Введение

Несмотря на жесткие условия среды, микроорганизмы колонизировали холодные места обитания на Земле. В зависимости от оптимальной температуры для роста, они могут быть психрофильными или психротолерантными (психротрофными). Психрофилы могут расти при низких температурах от -20 до 10°C и неспособны расти при температурах выше 15°C. Психротолерантные микроорганизмы, в свою очередь, имеют температурный оптимум роста от 20 до 25°C, но также сохраняют высокую метаболическую активность и способность к росту при температурах ниже 0°C [1]. Как правило, психротолерантных микроорганизмов находят в наземных экосистемах, а психрофильных – в морских [2].

Для поддержания метаболических процессов в холодных местах обитания, психрофилы используют ферменты, обладающие высокой удельной активностью при низких температурах. Такие ферменты обычно называются холодоактивными и являются перспективным ресурсом для применения в биотехнологии и промышленности. Благодаря высокой каталитической активности при температурах ниже 25°C, они представляют собой превосходный биокатализатор, не требующий нагревания, что обеспечивает более высокое качество продукции, устойчивость и эффективность промышленных процессов. Ферменты не токсичны, биоразлагаемы, а их селективное действие и высокая каталитическая активность обеспечивает высокую степень безопасности, низкие энергозатраты и экологически чистое производство [3].

Помимо активности при низких температурах, интересна также их высокая термолабильность, которая обеспечивает возможность быстрой инактивации этих ферментов путем мягкой термической обработки, что представляет особый интерес в пищевой промышленности [4].

Цель данной работы – создание базовой коллекции микробных изолятов психрофильных и психротолерантных микроорганизмов из почвы, перспективных для дальнейшей разработки биотехнологических препаратов.

### Материалы и методы

В ходе данной работы были исследованы 35 образцов почв, которые отбирали в период с сентября по декабрь 2018 года: по 3 образца из Сахалина, Якутии, ЕАО и Амурской области; по 5 образцов из Магадана и Итурупа; и 13 образцов с Камчатки из которых выделено 70 изолятов психрофильных и психротолерантных микроорганизмов (см. Таблицу 1).

Таблица 1 – районы исследования и изоляты микроорганизмов

Район отбора почвенных образцов (количество)	Изоляты (количество)
о. Сахалин (3)	Сах1, Сах2, Сах3, Сах4, Сах5 (5)
Якутия (3)	ЯВ13 ЯВ14 ЯП1 ЯП2 ЯУ1 ЯУ17 ЯУ3 ЯУ4 ЯУ6 ЯУ7 (10)
ЕАО (3)	Е1-2, Е1-4, Е2-1, Е2-2, Е3-1, Е3-2 (6)
Магадан (5)	М1-1, М1-2, М1-3, М1-4, М2-1, М2-2, М2-3, М3-2, М3-3, М3-4, М5-1 (11)
о. Итуруп (5)	И1-1, И2-1, И3-1, И3-2, И4-1, И4-2, И4-3, И5-1, И5-2, И5-3, И5-4, И5-5, И5-6, И5-7, И6-1 (15)
Камчатка (13)	1Г33ц, 2Г33ц, 3Т13ц, 4 Кам, 5 Кам, 6 Кам, КТ1, КТ10, КТ11, КТ12, КТ13, КТ2, КТ3, КТ4, КТ5, КТ6, КТ7, КТ8, КТ9 (19)
Амурская область (3)	Ам1, Ам2, Ам3, Ам4 (4)

Образцы почвы отбирали стерильными инструментами и помещали в стерильную посуду согласно ГОСТ 17.4.4.02-84 [5]. До начала работы образцы хранились в холодильнике при температуре от 4 до 5°C не более суток.

Для изоляции бактерий почвенную суспензию в отношении 1:10 (10 г почвы и 90 мл физ. раствора) диспергировали на шейкере ELMi Shaker S-3.09M (Германия) на 30 минут при 110 об/мин. Затем высевали на питательный агар методом Дригальского и инкубировали при 6°C в течение 7 дней.

Морфологию клеток исследовали в мазках, окрашенных по Граму с помощью микроскопа Carl Zeiss Axioskop 40 (Германия) с использованием объективов 40х и 100х.

Наиболее распространенные ферментативные активности (липазу [6], амилазу, протеазу [7]) проверяли на средах, с добавлением крахмала, 0,5% молока и Твин-80 соответственно, которые инкубировали при 4°C и 25°C в течение 1-7 дней.

Оптимальные температуры для роста устанавливали с помощью культивирования микроорганизмов в 100 мл питательного бульона при 6°C, 25°C и 37°C. Начальная концентрация микроорганизмов подсчитывалась с использованием камеры Горяева. Изменения концентрации определяли на фотоколориметре APEL AP-101. По полученным данным строились кривые роста.

Все цифровые данные, полученные в результате исследований, подвергали статистической обработке с использованием некоторых формул [8], а также компьютерных программ Statistic и Excel.

#### Результаты и обсуждения

В результате исследований 35 почвенных образцов было выделено 70 изолятов микроорганизмов, различным по своим морфологическим свойствам.

Все полученные в ходе работы изоляты были протестированы на ферментативную активность. Изоляты, выделенные из образцов почвы, собранных на о-ве Итуруп были более активны при 25°C. Два изолята из ЕАО (Е1-2 и Е2-1) показали липолитическую активность при 6°C, тогда как при 25°C она не проявлялась. Якутские изоляты не обладали липазной активностью при 6°C, но она проявилась при 25°C. Изоляты из Магаданской области при 6°C обладали только протеазной активностью, но при 25°C проявились амилазная и липазная. Камчатские изоляты не были активны при 6°C, но при 25°C амилолитическую активность показали 6 изолятов (1Г33ц, 2Г33ц, 3Т13ц, 4 Кам, 5 Кам, 6 Кам), протеолитическую активность - 6 изолятов (2Г33ц, 3Т13ц, КТ10, КТ12, КТ13, КТ8) и 1 изолят обладал липолитической активностью (КТ8). Изоляты из почв Амурской и Сахалинской областей совсем не обладали амилазной активностью, а при 6°C не показали ни одной из трех активностей.

В целом, можно сделать вывод, что все полученные изоляты, независимо от района сбора, были более активны при 25°C. При 6°C наиболее активны были изоляты из Итурупа, Магадана и ЕАО.

Среди всех изолятов, проявляющих амилазную активность, можно выделить И4-1, И5-3, Е1-4 и ЯП2 как наиболее активные (с зоной гидролиза более 5 мм). По протеазной активности выделяются изоляты И3-2, И4-1 и И5-7.

Всеми тремя активностями обладают только три из исследованных изолятов – И4-1, И5-6 и ЯП2. Две из трех активностей показали 16 изолятов (И1-1, И5-3, Е1-2, Е2-1, Е2-2, Е3-2, ЯУ3, ЯУ4, М2-1, М3-2, 2Г33ц, 3Т13ц, Сах1, Сах2, Сах3, Ам1).

При проверке температурных оптимумов некоторых наиболее перспективных изолятов, было установлено, что все они лучше растут при 25°C, но при этом также могут расти при 6°C, то есть являются психротрофами (рисунок 1).

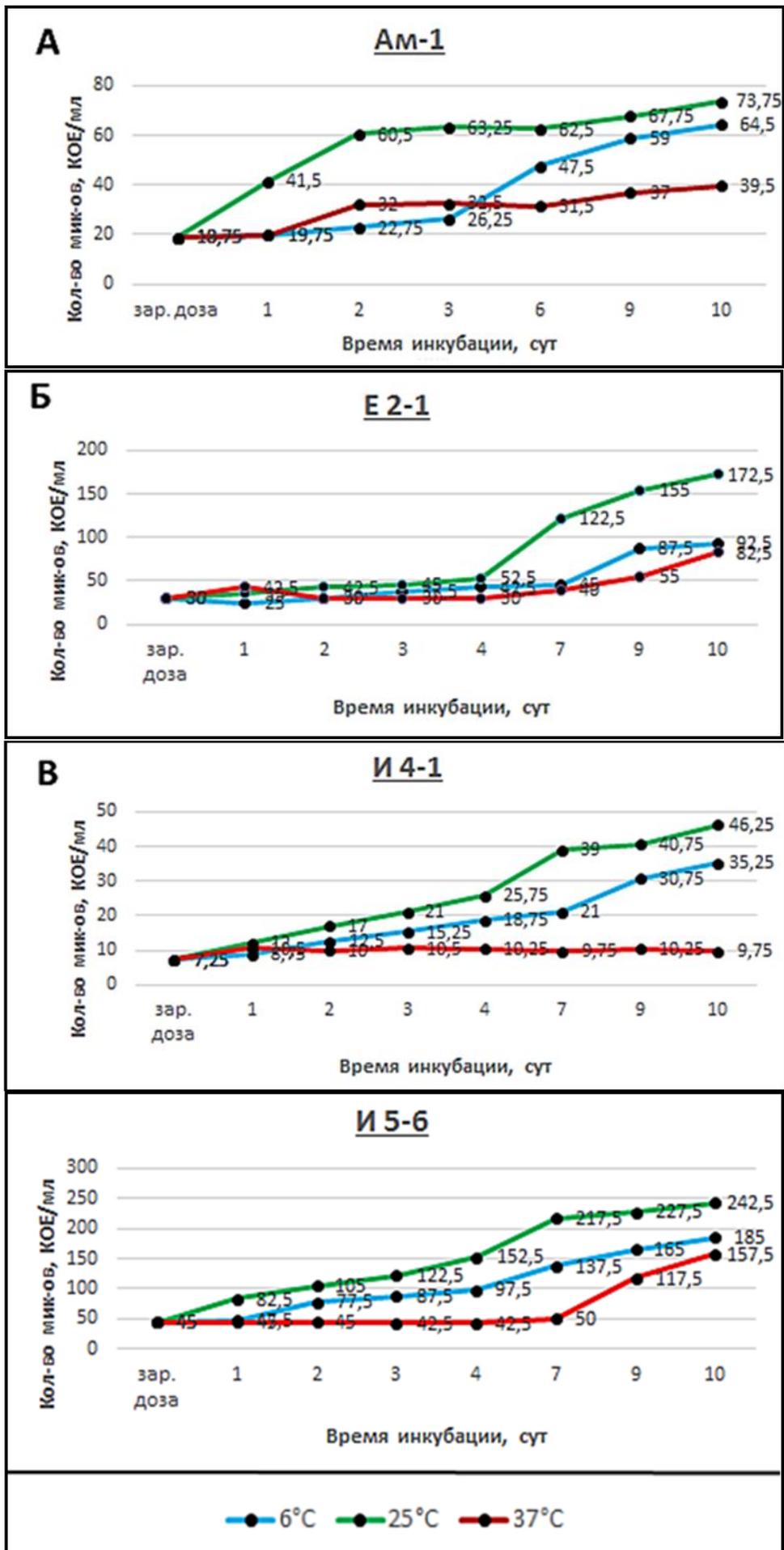


Рис. 1 – Кривые роста микроорганизмов, изолированных из образцов почв Амурской области (Ам-1), ЕАО (Е2-1) и Итурупа (И4-1, И 5-6), при различных температурах

**Заключение**

Таким образом, выявлено микробное разнообразие образцов почвы из семи регионов Дальнего Востока: Якутии, Сахалина, ЕАО, Амурской области, Магадана, Итурупа и Камчатки. В результате скрининга выделенных изолятов на наличие ферментативной активности было установлено, что всеми тремя активностями (амилазной, протеазной и липазной) обладают три изолята – И4-1, И5-6 и ЯП2. Две из трех активностей показали 16 изолятов (И1-1, И5-3, Е1-2, Е2-1, Е2-2, Е3-2, ЯУ3, ЯУ4, М2-1, М3-2, 2Г33ц, 3Т13ц, Сах1, Сах2, Сах3, Ам1). Температурные оптимумы всех исследованных изолятов находятся в пределах 25С, но также возможен рост при 6С. Таким образом, их можно отнести к психротрофным микроорганизмам. Наиболее перспективными являются 21 изолят, которые были введены в коллекцию для дальнейшего изучения.

**Финансирование**

Статья подготовлена по результатам работы, выполненной при финансовой поддержке Президиума ДВО РАН (проект 18-МНТ-010).

**Благодарности**

Выражаем благодарность за помощь в отборе образцов почв в Магаданской области – д.б.н., главному научному сотруднику, Макаренко Е.А. и на о. Итуруп – к.б.н., ведущему научному сотруднику ФНЦ Биоразнообразия ДВО РАН, Булах Е.М.

**Конфликт интересов**

Не указан.

**Funding**

The article was prepared based on the results of work carried out with the financial support of the Presidium of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (project 18-MHT-010).

**Acknowledgement**

We are grateful for the help in the selection of soil samples in the Magadan Region - PhD in Biology, Chief Researcher FSC East Asia Terrestrial Biodiversity FEB RAS, E.A. Makarchenko and on Iturup Island - PhD in Biology, Leading Researcher FSC East Asia Terrestrial Biodiversity FEB RAS, E.M. Bulakh

**Conflict of Interest**

None declared.

**Список литературы / References**

1. Pikuta E.V. Microbial extremophiles at the limits of life/ E.V. Pikuta, R.B. Hoover, J. Tang // Crit Rev Microbiol. - 2007. - №33(3). - p. 183-209.
2. Yumoto I. Cold-Adapted Microorganisms/ I. Yumoto // Norfolk, UK: Horizon Scientific Press. - 2013. - p. 244.
3. Wang S.Y. A novel cold-active xylanase from the cellulolytic myxobacterium *Sorangium cellulosum* So9733-1: gene cloning, expression, and enzymatic characterization / S.Y. Wang, W. Hu, X.Y. Lin, Z.H. Wu, Y.Z. Li // Appl Microbiol Biotechnol. - 2012. - №93(4). - p. 1503-12.
4. Margesin R. Biotechnological applications of psychrophiles/ R. Margesin, G. Feller // Environ Technol. - 2010. - №31(8-9). - p. 835-44.
5. ГОСТ 17.4.4.02-84 Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. – Введ. 1986-01-01. – М.: Изд-востандартов, 1985. – 8с.
6. Booth C. Introduction to general methods. / C. Booth // Methods Microbiol. Academic Press, New York, 1978. – pp 57–91.
7. Priest F.G. Extracellular enzyme synthesis in the genus Bacillus / F.G. Priest // Bacteriol Review. – 1977. – V.41. – pp. 711–753.
8. Лакин Г.Ф. Биометрия / Г.Ф. Лакин. - М.: Высшая школа, 1990. - 350 с.

**Список литературы на английском языке / References in English**

1. Pikuta E.V. Microbial extremophiles at the limits of life/ E.V. Pikuta, R.B. Hoover, J. Tang // Crit Rev Microbiol. - 2007. - №33(3). - p. 183-209.
2. Yumoto I. Cold-Adapted Microorganisms/ I. Yumoto // Norfolk, UK: Horizon Scientific Press. - 2013. - p. 244.
3. Wang S.Y. A novel cold-active xylanase from the cellulolytic myxobacterium *Sorangium cellulosum* So9733-1: gene cloning, expression, and enzymatic characterization / S.Y. Wang, W. Hu, X.Y. Lin, Z.H. Wu, Y.Z. Li // Appl Microbiol Biotechnol. - 2012. - №93(4). - p. 1503-12.
4. Margesin R. Biotechnological applications of psychrophiles/ R. Margesin, G. Feller // Environ Technol. - 2010. - №31(8-9). - p. 835-44.
5. GOST 17.4.4.02-84 Oхрана prirody. Pochvy. Metody otbora i podgotovki prob dlya himicheskogo, bakteriologicheskogo, gel'mintologicheskogo analiza [Protection of Nature. The soil. Sampling and sample preparation methods for chemical, bacteriological, helminthological analysis]. – Vved. 1986-01-01. – М.: publishing house standartov, 1985. – 8p. [in Russian]
6. Booth C. Introduction to general methods. / C. Booth // Methods Microbiol. Academic Press, New York, 1978. – pp 57–91.
7. Priest F.G. Extracellular enzyme synthesis in the genus Bacillus / F.G. Priest // Bacteriol Review. – 1977. – V.41. – pp. 711–753.
8. Lakin G.F. Biometriya [Biometry] / G.F. Lakin. - М.: Vysshaya shkola, 1990. - 350 p. [in Russian]

## ХИМИЧЕСКАЯ МОДИФИКАЦИЯ АМИНОПОЛИСАХАРИДА ИЗ ПАНЦИРЯ КРЕВЕТОК ПРЯМЫМ СОЕДИНЕНИЕМ С ПОЛИАНИЛИНОМ

Научная статья

Нгуен Тхи Линь<sup>1,\*</sup>, Нго Тхань Хай<sup>2</sup>, Ву Ван Тоан<sup>3</sup>, Ле Динь Чиен<sup>4</sup>  
<sup>1,2,3</sup> Ханойский университет горного дела и геологии, Вьетнам, Ханой;  
<sup>4</sup> Вьетнамская государственная нефтегазовая компания, Вьетнам, Ханой

\* Корреспондирующий автор (nguyenthilinh[at]humg.edu.vn)

**Аннотация**

Аминополисахарид был модифицирован деацетилизацией хитина из панциря креветок с использованием фермента в качестве биокатализатора и микроволновой энергии. Модифицированный аминополисахарид имеет степень деацетилирования на 83 выше, чем при использовании обычного химического метода. Аминополисахарид был успешно соединен по свободно-радикальному механизму с инициатором персульфата аммония. Реакцию проводили в водной среде. Влияние температуры реакции, времени реакции, массового соотношения аминополисахарида к анилину было исследовано. Полученные результаты показали, что наилучшими условиями для соединения аминополисахарида были следующие: массовое соотношение аминополисахарида к анилину составляло 1:2, температура реакции - 5°C и время реакции 60 минут. Модифицированный аминополисахарид характеризуется Фурье-спектроскопией и сканирующей электронной микроскопией. Степень соединения модифицированного аминополисахарида получена 41%.

**Ключевые слова:** хитин, аминополисахарид, прямое соединение, модифицированный аминополисахарид; Степень деацетилирования, степень соединения; полианилин.

## CHEMICAL MODIFICATION OF AMINOPOLYSACCHARIDE FROM SHRIMP SHELL BY DIRECT GRAFTING WITH POLYANILINE

Research article

Nguyen Thi Linh<sup>1,\*</sup>, Ngo Thanh Hai<sup>2</sup>, Vu Van Toan<sup>3</sup>, Le Dinh Chien<sup>4</sup>  
<sup>1,2,3</sup> Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam;  
<sup>4</sup> Vietnam Oil and Gas Group, Hanoi, Vietnam

\* Corresponding author (nguyenthilinh[at]humg.edu.vn)

**Abstract**

Aminopolysaccharide was modified by deacetylation of chitin from shrimp shell using enzyme as a biocatalyst and microwave energy. Modified aminopolysaccharide has degree of deacetylation of 83 higher than that of using normal chemical method. Aminopolysaccharide was successfully grafted with aniline by free radical mechanism with ammonium persulfate initiator. The reaction was carried out in aqueous medium. The effect of reaction temperature, reaction time, aminopolysaccharide: aniline weight ratio were investigated. The results showed that the best conditions for grafting of aminopolysaccharide were aminopolysaccharide: aniline weight ratio of 1:2, reaction temperature of 5°C and reaction time of 60 minutes. The modified aminopolysaccharide was characterized by Fourier transform infrared spectroscopy and Scanning electron microscopy. Degree of Grafting of modified aminopolysaccharide obtained 41%.

**Keywords:** Chitin, aminopolysaccharide, direct grafting, modified aminopolysaccharide; Degree of Deacetylation, Degree of Grafting; polyaniline.

**1. Introduction**

Chitin is valuable material and is known to be the natural polysaccharide. Chitin can be extracted from the crust of marine invertebrates (prawn shells, lobster shells, scab cuttlefish...), mollust, insects, fungi but mainly from crab and shrimp shells of waste byproducts from the seafood processing industries to protect environment [1], [2]. Chitin is a heteropolymer made up of  $\beta$  (1 → 4)-2-acetamido-2-deoxy- $\beta$ -D-glucopyranose units with acetamide group at C2 positions can attend in the deacetylation reaction to form aminopolysaccharide (chitosan) [3], [4]. Chitosan has found application in many fields, including food processing, medicine, and wastewater treatment.

Aminopolysaccharide is modified from chitin shell that called natural aminopolysaccharide containing  $\beta$ (1,4)-D glucosamine units and N-acetyl- D-glucosamine units. Aminopolysaccharide and its derivatives are non-toxic, degradable biopolymers [8], [9]. Beside all these value properties, aminopolysaccharide has remained underutilized biopolymer primarily due to its coiling in liquid medium result in the functional groups is counteracted [10].

The chemistry of aminopolysaccharide is interesting due to the presence of hydroxyl groups at C<sub>3</sub> and C<sub>6</sub> and amine group at C<sub>2</sub> position [11], [12]. Recently, there has been great interest in chemical modification of aminopolysaccharide to prevent its coiling in order to improve its linear flexible chains and widen its application in environmental and biomedical fields [13], [14].

Chemically modified aminopolysaccharide was carried using pyridine, grafting with polystyrene, glycidyl methacrylate, indirect grafting with aniline, etc., to make biosensors, adsorbents for wastewater treatment. However, the grafting of aminopolysaccharide was carried indirectly through organic bridges.

In the present work, we report for the first time the chemical modification of aminopolysaccharide by direct grafting with polyaniline using ammonium persulfate as an initiator.

## 2. Materials and methods

### 2.1. Materials

Shrimp shell was collected from refrigerated shrimp production of Minh Hai company (Vietnam), ammonium persulfate, enzyme papain were purchased from Sigma-Aldrich, sodium hydroxide, hydro chloride, ethanol, acetic acid were purchased from Xilong chemicals company (China), aniline from Merck.

### 2.2. Extraction and conversion of chitin for aminopolysaccharide

Shrimp shell was treated with 10% HCl solution (solid/liquid ratio 1/10) at ambient temperature in 12h until gas bubble disappears (heating method) or placed in microwave oven at 500W in 8 minutes (microwave method) and then the shrimp shell must be washed with demineral water to neutral state (pH=7) to remove minerals.

The demineralized shells were immersed in papain enzyme/phosphate 7 buffer solution at 60°C for 30 minutes to remove protein. The sample was finally washed with distilled water and then dried in a vacuum oven at 60°C to constant weight. Deproteinized shell has light pink what decolorized by exposing in the natural light to remove pigments. After that all, the product of extraction is extracted chitin.

Chemical deacetylation was carried out by treatment of extracted chitin with 50% sodium hydroxide (NaOH) at 90°C in 4.5h using heating method or using microwave method in 8 minutes at 350W. Deacetylated product has opalesque white, is aminopolysaccharide.

### 2.3. Synthesis of aminopolysaccharide grafting polyaniline

In a typical procedure, an aqueous solution of aminopolysaccharide (0.3g) was prepared by dissolving aminopolysaccharide in 150mL of aqueous acetic acid 1% for 10 minutes with stirring of 600 rpm. Adding 5.63 mmol aniline in hydrochloride 1M to form a homogenous solution. The homogenous solution fed into aminopolysaccharide solution.

Ammonium persulfate was added to the above and interact with the aminopolysaccharide solution for 30 min before adding the monomer. Copolymers of soluble aminopolysaccharide and aniline were prepared using different parameters namely aminopolysaccharide:monomer weight ratio, temperature, reaction time, with constant stirring at 600 rpm. While the reaction was transferring from emeraldine color to dark green, ethanol was poured into the reaction to precipitate the crude grafted polymer. The precipitate was filtered using sintered glass funnel, dried under vacuum at 40°C as powdery material until a constant weight was achieved. The crude graft polymer was washed with aniline (Soxhlet extraction) for 24 h to remove any polyaniline present. The extracts were filtered using sintered funnel, washed with ethanol to rinse the copolymer. The clean graft copolymers were dried to a constant weight in a vacuum oven at 60°C for 24h. The direct grafting of aminopolysaccharide by aniline was expressed in scheme 1.

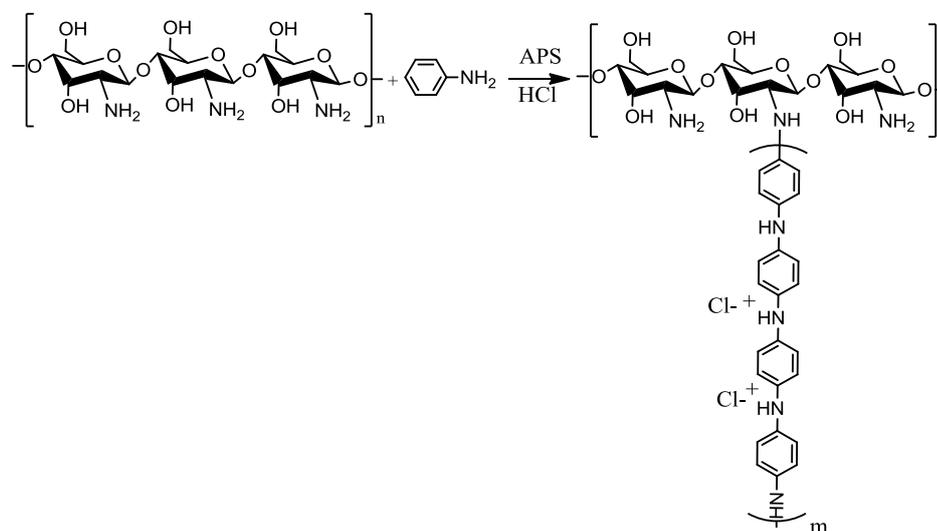


Fig. 1 – Direct grafting of aminopolysaccharide by aniline

### 2.4. Characterization techniques

Fourier transform infrared (FTIR) spectra was recorded between 400- 4000  $\text{cm}^{-1}$  with a 4  $\text{cm}^{-1}$  resolution from KBr pallets on a JASCO FT/IR- 4600 spectrometer to define the molecular structure of parent aminopolysaccharide and grafted aminopolysaccharide. The morphologies of grafted polymer were determined by scanning electron microscopy (SEM) working at 5 kV.

FTIR spectroscopy was also determined degree of deacetylation (DD) of parent aminopolysaccharide and grafting degree (GD) of modified aminopolysaccharide. The DD of the aminopolysaccharide samples was calculated base on the absorbances at about 1650 $\text{cm}^{-1}$  and 3450  $\text{cm}^{-1}$  according to the follow equation [19]:

$$\text{DD} (\%) = 100 - [(A_{1650}/A_{3450}) \times 100/1.33]$$

Where  $A_{1650}$  and  $A_{3450}$  are absorbance at 1650  $\text{cm}^{-1}$  of the amide I of the N-acetyl group and 3450  $\text{cm}^{-1}$  of amine group in aminopolysaccharide.

The DG is the percentage of grafting of aminopolysaccharide by aniline. The DG was suggested by calculating the DD of parent aminopolysaccharide and the DD of modified aminopolysaccharide by grafting by follow equation:

$$\text{DG} (\%) = \text{DD}_{\text{parent}} - \text{DD}_{\text{modified}}$$

Where  $DD_{\text{parent}}$  and  $DD_{\text{modified}}$  are the DD of parent aminopolysaccharide and the DD of modified aminopolysaccharide by grafting.

### 3. Results and discussion

#### 3.1. Characterisation of chitin from shrimp shell

Chitin was extracted from shrimp shell using enzyme papain as a catalyst to remove protein, chemical method and microwave were used for the elimination of mineral salts of shrimp shell. FT-IR spectra of chitin are shown in Fig. 1.

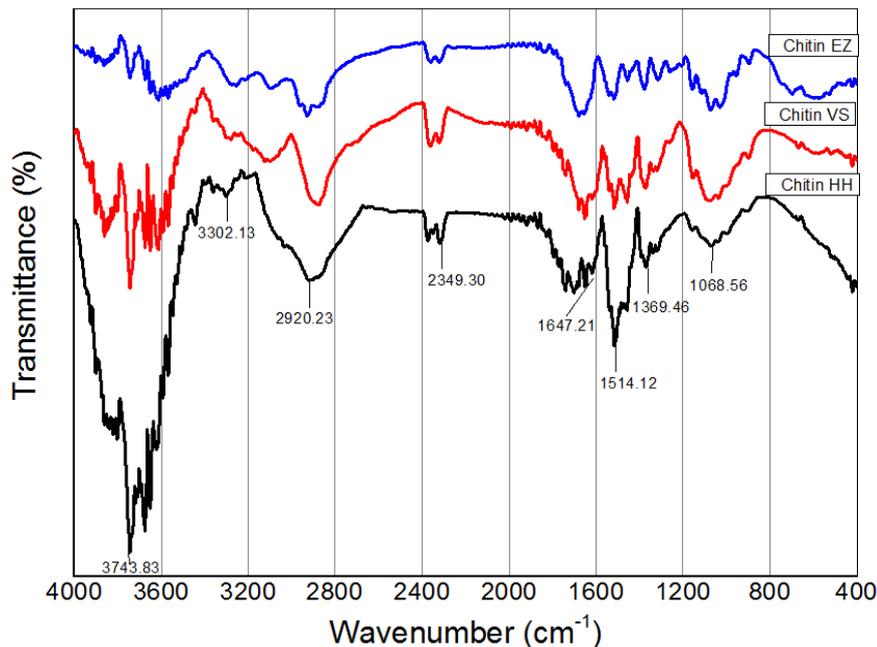


Fig. 1 – FT-IR of chitin from shrimp shell using chemical method (Chitin HH), microwave method (Chitin VS) and enzyme (Chitin EZ)

FTIR spectra of chitin from shrimp shell using chemical method (Chitin HH), microwave method (Chitin VS) and enzyme (Chitin EZ) shows that bands characteristic for three chitin samples are similar. Broad band at  $3302\text{ cm}^{-1}$  ascribe H-bonded of NH stretching vibration. Bands at  $2920\text{ cm}^{-1}$  and  $2349\text{ cm}^{-1}$  refer to CH stretch in acetyl amino of chitin. The amide I band is split at about  $1647\text{ cm}^{-1}$  with low absorption. This result illustrated that extracted chitin structure contains a little amide I. The absorbance at  $1514\text{ cm}^{-1}$  is due to protein is not present in chitin after deproteination by enzyme in 30 minutes while the band is present if deproteination is carried out using normal chemical method with 40% NaOH in 6h. The band at  $1369\text{ cm}^{-1}$  represent symmetric stretching vibration of  $\text{CH}_3$  of acetyl amino group of chitin. The band at  $1068\text{ cm}^{-1}$  assign to C-O-C stretching vibration. The absence of band around  $870\text{ cm}^{-1}$  indicates that mineral has been removed.

#### 3.2. Characterisation of aminopolysaccharide

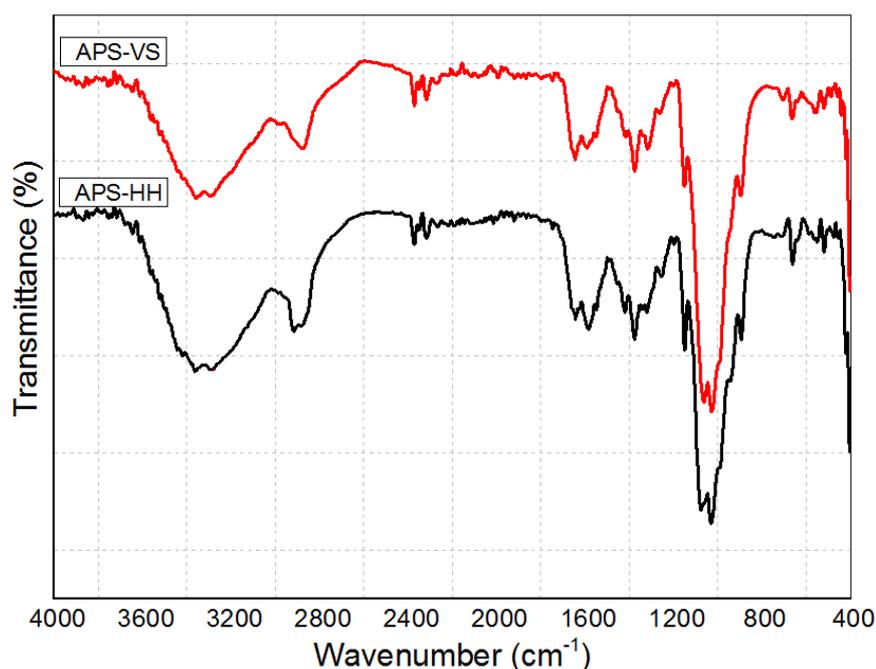


Fig. 2 – FTIR of aminopolysaccharide from chitin using normal method (APS-HH) and microwave method (APS-VS)

The FTIR spectrum of aminopolysaccharide Fig. 2 shows that the characteristic absorption bands at  $3340\text{ cm}^{-1}$  –  $3400\text{ cm}^{-1}$  and  $2800\text{--}2900\text{ cm}^{-1}$  corresponding to OH, NH stretching regions of aminopolysaccharide. The band at about  $1600\text{ cm}^{-1}$  was assigned to amide I of aminopolysaccharide. The disappearance of amide II of chitin shown that deacetylation of chitin was occurred to convert amide I into amine group.

FTIR spectroscopy was also used to define the degree of deacetylation of aminopolysaccharide (DD). The DD of the aminopolysaccharide samples was calculated from the absorbances at  $1658\text{ cm}^{-1}$  and  $3450\text{ cm}^{-1}$ . Degree of deacetylation of normal method aminopolysaccharide (APS-HH) is 78 while by using microwave the DD of APS is 83.

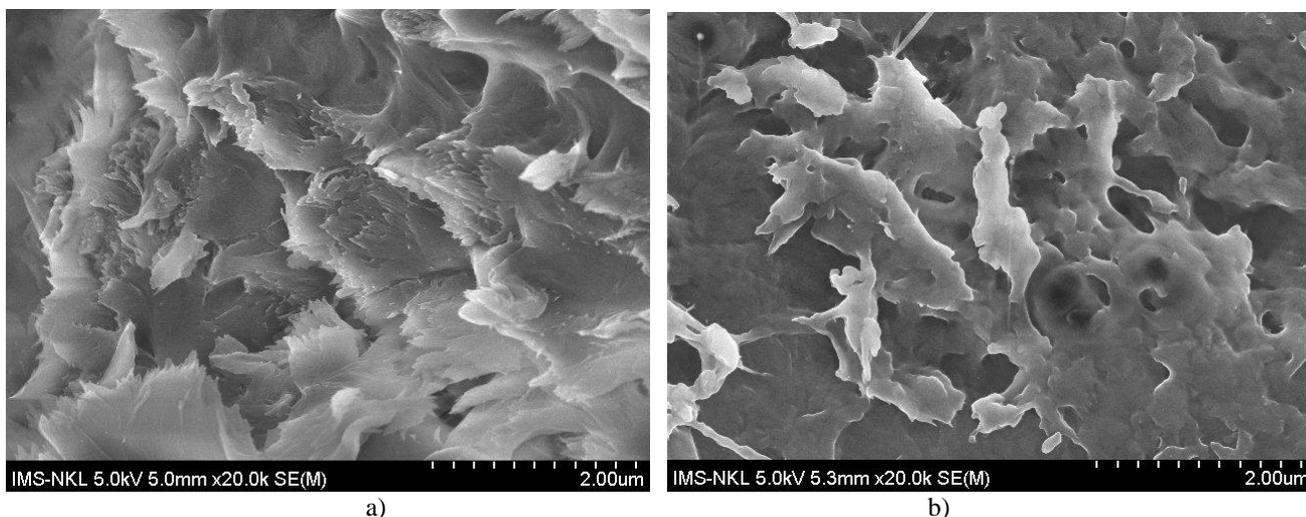


Fig 3 – Image SEM of aminopolysaccharide using microwave (APS-VS) (a) and normal chemical methods (APS-HH) (b)

The result of SEM images showed that aminopolysaccharide is very uniform with a lamellar organization and crystalline structure that converted under microwave condition beside the sample of chemical method with dense block appears. The lamellar structure of APS-VS was suggested for modification of aminopolysaccharide by direct grafting with aniline.

### 3.3. Characterisation of polyaniline grafted aminopolysaccharide

#### 3.3.1. FTIR analysis

The grafting of APS with aniline was carried out with present of ammonium persulfate such as an initiator. The grafting is favored with free radical mechanism in here ammonium persulfate can be decomposed thermally under suitable temperature to form pair of initiating radicals. The radicals abstract the hydrogen atom attached to the amine group of aminopolysaccharide molecule to form macroradical thereby generating an active center that could be used to graft aniline onto the backbone [16], [20]. Aminopolysaccharide macroradical were treated with aniline to initiate graft copolymerization by free radical mechanism. The macroradical attacked the amine group of the aniline and generate radicals onto it which resulted to repeat propagation processes. The resulting graft copolymer was precipitated by pouring ethanol and finally the precipitate was washed with aniline by Soxhlet extraction to remove any free polyaniline.

The preparation of graft copolymers was carried out with different degree of grafting (DG) by considering the reaction parameters.

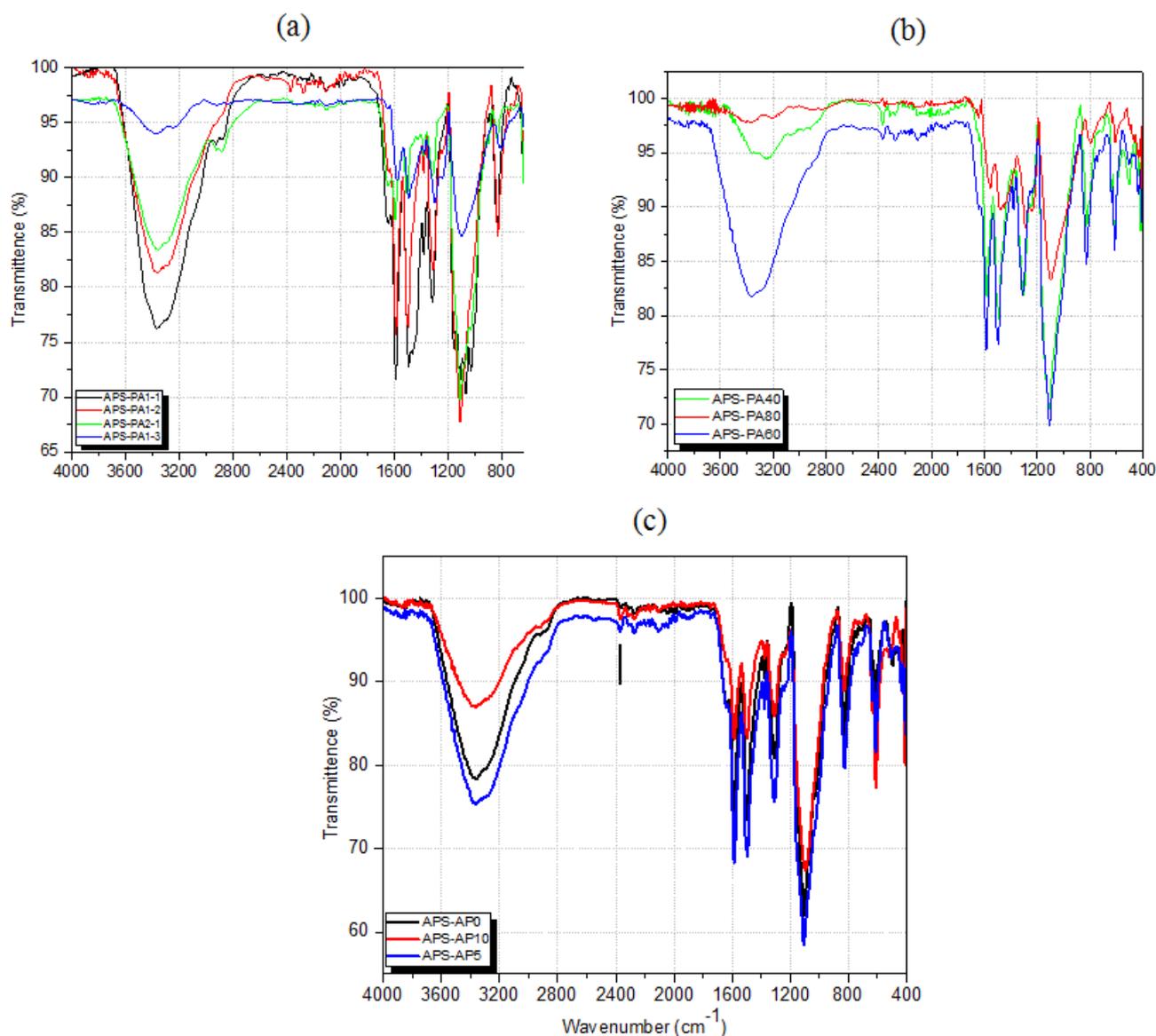


Fig. 4 – FTIR of aminopolysaccharide grafting polyaniline in different conditions: (a) APS-PA synthesized in different APS:PA ratios, (b) different reaction times, (c) different temperatures

The FTIR spectra of aminopolysaccharide grafting polyaniline samples with different ratio of APS and aniline are shown in Fig.4. It can be seen from the FTIR spectra that the grafted polymers have characteristic bands of both aminopolysaccharide and substituted polyaniline. The absorption band at  $3380\text{ cm}^{-1}$  with different transmittance belonging to  $-\text{NH}_2$  group of aminopolysaccharide. The difference of  $-\text{NH}_2$  group transmittance due to this group attend to grafting to form bond with polyaniline. The band around  $1641\text{ cm}^{-1}$  are ascribed to the  $-\text{NH}_2$  group bending vibration. New absorption bands found in the APS-PA at  $1550\text{ cm}^{-1}$ ,  $1370\text{ cm}^{-1}$ ,  $807\text{ cm}^{-1}$  are characteristic of the nitrogen quinone structure in the polyaniline bands, phenyl bands, aromatic C-H bending with a sharp vibration in the aromatic ring structure containing parasubstitutes of polyaniline bands, respectively. The results of investigation shown that the best condition for synthesis of polyaniline grafted aminopolysaccharides were APS:PA ratio of 1:2, reaction time of 60 minutes and temperature of  $5^\circ\text{C}$ . Moreover, the band at  $1641\text{ cm}^{-1}$  has changed to lower wavenumber and the new bands are characteristics of the polyaniline side chains on the backbone of aminopolysaccharide. This result indicates interaction between polyaniline and aminopolysaccharide.

The reaction time was determined in the range of 40-80 minutes. The reaction was stopped by allowing air into the reaction vessel and then the reaction mixture was poured into ethanol. It was observed that the reaction time of 60 minutes yielded the highest DG (41%) in aminopolysaccharide-g-PA copolymer as shown in Table 1. Longer reaction time would result to homopolymerization due to chain transfer and termination of the growing radicals. Since the grafting was manifested only on the surface of the trunk polymer granules as such, this has effect on the rate of graft copolymerization.

Reaction temperature has great role on copolymerization. The results obtained in Table 1 showed that graft copolymerization was favoured at temperature of  $5^\circ\text{C}$ ; as percentage grafting of 41%. Higher temperature promotes decomposition of the initiator, which could lead to creating more active sites (radicals) on the backbone of the chitin molecule (Scheme 1). At temperature above  $5^\circ\text{C}$ , the percentage grafting was reduced. This could be a result of the increase in conversion of initiator to free radicals which would promote termination of the growing radicals and could result to low molecular weight copolymer.

Grafting degree of aminopolysaccharide with polyaniline at various synthesis conditions is shown in Table 1.

Table 1 – Grafting degree of the APS-PA samples

Samples	Synthesis conditions			DD <sub>modified</sub> (%)	DG (%)
	Ratio APS:PA (w/w)	Reaction temperature (0°C)	Reaction time (min)		
APS-PA <sub>opt</sub>	1:2	5	60	42	41
APS-PA1-1	1:1	5	60	62	21
APS-PA 1-3	1:3	5	60	56	27
APS-PA 40	1:2	5	40	45	38
APS-PA 80	1:2	5	80	62	21
APS-PA0	1:2	0	60	58	25
APS-PA10	1:2	10	60	54	21

### 3.3.2. Morphology

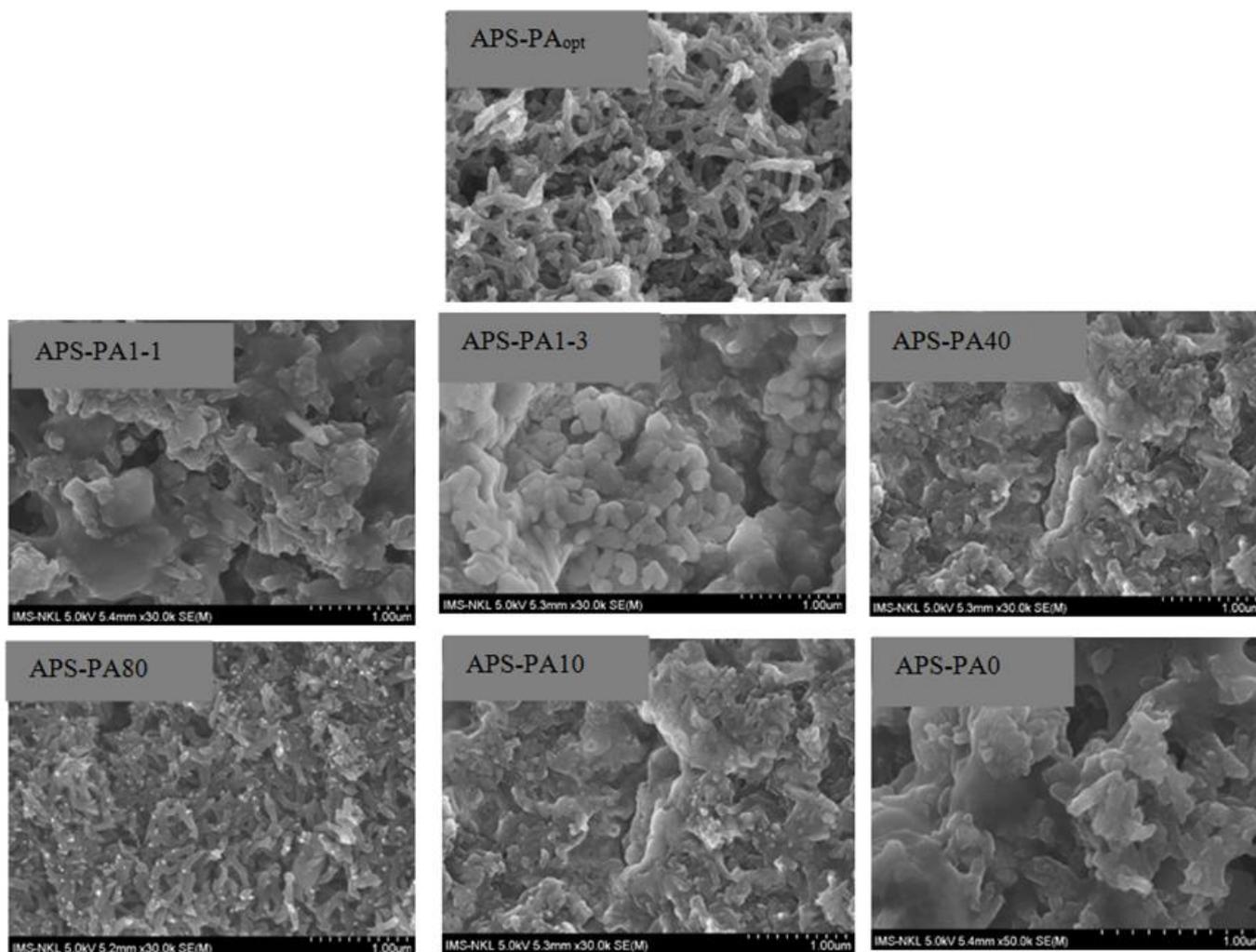


Fig. 5 – SEM images of polyaniline grafted aminopolysaccharide samples in different conditions

Fig 5. shows scanning electron micrographs of APS-PA samples that were synthesized under different conditions. The morphology of the samples are compared at magnification of 30 000 times. The APS/PA1-1, APS/PA1-3, APS-PA40, APS/PA-80, APS/PA-10,APS/PA0 have ununiform structure with the arrange randomly. At the ratio of aminopolysaccharide and aniline is lower than ratio of  $\frac{1}{2}$  resulting in the grafting occurred uncompletely. On the contrary, at the high ratio, long reaction time, the appearance of exessed polyaniline covered on the aminopolysaccharide surface.

The mophology of APS-PA<sub>opt</sub> has fibers to make porous structure. From the images, it can be deduced that APS-PA<sub>opt</sub> has more homogenous structure than others.

### 4. Conclusions

Aminopolysaccharide was converted from chitin of shimp shell by using enzyme and microwave energy in order to reduce used chemicals and energy. The FTIR of aminopolysaccharide confirmed that conversion of amide group in chitin into amine group in aminopoyasaccharide. The aminopolysaccharide using microwave obtained degree of deacetylation of 83%. Grafted polyaniline on aminoplysaccharide copolymer was synthesized by chemical oxidation under free radical mechanism. The grafting aminopolysaccharide was synthesized under optimal condition with APS/PA ratio of  $\frac{1}{2}$ , reaction time of 60 minutes,

reaction temperature of 5°C. APS-PA<sub>opt</sub> sample carries polyaniline bands on the side chains due to grafting of aniline. The samples have porous structure and uniform that are suitable candidates for applications in environmental treatment.

#### Благодарности

Авторы выражают благодарность Ханойскому горно-геологическому университету а также Министерству образования и обучения Вьетнама (МОЕТ) за финансовую поддержку.

#### Конфликт интересов

Не указан.

#### Acknowledgement

The authors are grateful to Hanoi University of Mining and Geology and Vietnam Ministry of Education and Training (MOET) for financial support.

#### Conflict of Interest

None declared.

#### Список литературы / References

- Musarrat H. Extraction of chitin from prawn shells and conversion to low molecular mass chitosan / Musarrat H. Mohammed A, Peter A. Williams A, Tverezovskaya O.. // *Food Hydrocolloids*, 31, 2013.- P 166-171.
- Sagheer F.A. Al. Extraction and characterization of chitin and chitosan from marine sources in Arabian Gulf / Sagheer F.A. Al, M.A. Al-Sughayer, S. Muslim, M.Z. Elsabee. // *Carbohydrate Polymers*, 77, 2009. – P. 410–419.
- Guilherme L. Surface modification of chitin using ultrasound-assisted and supercritical CO<sub>2</sub> technologies for cobalt adsorption / Guilherme L. Dotto, Jeanine M. Cunha, Camila O. Calgareo, Eduardo H. Tanabe, Daniel A. Bertuol. // *Journal of Hazardous Materials*, 295, 2015. – P. 29–36.
- Muryeti, Estuti Budi Mulyani Adsorption of Carbon Black Using Chitosan in the Drinking / Muryeti, Estuti Budi Mulyani, Elya Sinurat. // *Process Procedia Chemistry*, 17, 2015. – P.106 – 110.
- Rathinam Karthik. Removal of Pb(II) and Cd(II) ions from aqueous solution using polyaniline grafted chitosan / Rathinam Karthik, Sankaran Meenakshi. // *Chemical Engineering Journal*, 263, 2015. – P. 168–177.
- Ayse Gul Yavuz A comparison study of adsorption of Cr(VI) from aqueous solutions onto alkyl-substituted polyaniline/chitosan composites / Ayse Gul Yavuz, Elif Dincturk-Atalay, Aysegul Uygun, Fethiye Gode, Erhan Aslan. // *Desalination*, 279, 2011. – P. 325–331
- Thirugnanasambandham K. Application of chitosan as an adsorbent to treat rice mill wastewater—Mechanism, modelling and optimization / Thirugnanasambandham K., V. Sivakumar, J. Prakash Maran. // *Carbohydrate Polymers*, 97, 2013. – P. 451–457.
- Álvaro J. Leite Synthesis and characterization of bioactive biodegradable chitosan composite spheres with shape memory capability / Álvaro J. Leite, Sofia G. Caridade, João F. Mano. // *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2015.
- Gre' gorio Crini Application of chitosan, a natural aminopolysaccharide, for dye removal from aqueous solutions by adsorption processes using batch studies: A review of recent literature / Gre' gorio Crini, Pierre-Marie Badot. // *Prog. Polym. Sci.* 33, 2008. – P. 399–447.
- Odile Carrier, Rudy Covis Inverse emulsions stabilized by a hydrophobically modified polysaccharide / Odile Carrier, Rudy Covis, Emmanuelle Marie, Alain Durand // *Carbohydrate Polymers*, 84, 2011. – P. 599–604.
- Junhua Wang Recent progress on synthesis, property and application of modified chitosan: An overview / Junhua Wang, Li Wang, Haojie Yu, Zain-ul-Abdin, Yongsheng Chen, Qing Chen, Weidong Zhou, Hongtao Zhang, Xiao Chen. // *International Journal of Biological Macromolecules*, 88, 2016. – P. 333–344.
- Jian-Ya Qian Antioxidation and α-glucosidase inhibitory activities of barley polysaccharides modified with sulfation / Jian-Ya Qian, Ye-Yu Bai, Jing Tang, Wei Chen // *LWT - Food Science and Technology*, 64, 2015. – P. 104-111.
- Xuemei He Removal of direct dyes from aqueous solution by oxidized starch cross-linked chitosan/silica hybrid membrane / Xuemei He, Mei Du, Hui Li, Tianchi Zhou. // *International Journal of Biological Macromolecules*, 82, 2016. – P. 174–181.
- Huacai Ge Synthesis and characterization of poly(maleic acid)-grafted crosslinked chitosan nanomaterial with high uptake and selectivity for Hg(II) sorption / Huacai Ge, Tingting Hua. // *Carbohydrate Polymers*, 153, 2016. – P. 246–252.
- Cintia S. Oliveira Pyridine derivative covalently bonded on chitosan pendant chains for textile dye removal / Cintia S. Oliveira, Claudio Airoidi // *Carbohydrate Polymers*, 102, 2014. – P. 38–46.
- Ahmedy Abu Naim Chemical modification of chitin by grafting with polystyrene using ammonium persulfate initiator / Ahmedy Abu Naim, Abdulganiyu Umar, Mohd Marsin Sanagi, Noraimi Basaruddin. // *Carbohydrate Polymers*, 98, 2013. – P.1618–1623.
- Tahia B. Mostafa An approach toward construction of tuned chitosan/polyaniline/metal hybrid nanocomposites for treatment of meat industry wastewater / Tahia B. Mostafa, Atef S. Darwish. // *Chemical Engineering Journal*, 243, 2014.- P. 326–339.
- Sayyah S.M. Kinetic studies and grafting mechanism for methyl aniline derivatives onto chitosan: Highly adsorptive copolymers for dye removal from aqueous solutions / Sayyah S.M., Amr A. Essawy, A.M. El-Nggar. // *Reactive and Functional Polymers*, 96, 2015. – P. 50–60.
- Baskar D. Effect of deacetylation time on the preparation, properties and swelling behavior of chitosan films // Baskar D., T.S. Sampath Kumar. // *Carbohydrate Polymers*, 78, 2009. – P. 767–772.
- Huacai Ge Synthesis and characterization of poly(maleic acid)-grafted crosslinked chitosan nanomaterial with high uptake and selectivity for Hg(II) sorption / Huacai Ge, Tingting Hua. // *Carbohydrate Polymers*, 153, 2016. – P. 246–252.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.90.12.037>**МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОЛЕЙ ДИПИРИДИЛИЯ В ПРОДУКЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА И РАСТЕНИЕВОДСТВА**

Научная статья

**Федорова Н.Е.<sup>1,\*</sup>, Мухина Л.П.<sup>2</sup>**<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-8278-6382;<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-2033-6869;<sup>1,2</sup> ФБУН «Федеральный научный центр гигиены им. Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора, Мытищи, Россия

\* Корреспондирующий автор (analyt1[at]yandex.ru)

**Аннотация**

Представлены методические особенности методов определения остаточных количеств солей дипиридилия (на примере диквата дибромида) в картофеле, семенах гороха, рапса, сои и растительных маслах с применением ион-парной высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) с ультрафиолетовым детектором после экстракции вещества из анализируемой пробы разбавленной серной кислотой при кипячении, очистки экстракта и концентрировании вещества ионообменной хроматографией на колонке с катионитом Дауэкс 50Wx8, а также дополнительной очистке на патроне для твердофазной экстракции C18 Sep Pak. Достигнуты нижние пределы количественного определения диквата в клубнях картофеля – 0,025 мг/кг, семенах сои, рапса, подсолнечника, горохе – 0,05 мг/кг, растительных маслах – 0,05 мг/кг.

**Ключевые слова:** дипиридилий, дикват, остаточные количества, ион-парная высокоэффективная жидкостная хроматография, ионообменная хроматография.

**METHODOLOGICAL FEATURES OF DETERMINATION OF DIPYRIDYL SALTS IN AGRICULTURE AND PLANT PRODUCTS**

Research article

**Fedorova N.E.<sup>1,\*</sup>, Muhina L.P.<sup>2</sup>**<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-8278-6382;<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-2033-6869;<sup>1,2</sup> FBUN "Federal scientific center of Hygiene n. a. F.F. Erisman", Mytischki, Russia

\* Corresponding author (analyt1[at]yandex.ru)

**Abstract**

The paper presents methodological features of methods for determining the residual amounts of dipyridyl salts (on the example of dibromide diquat) in potatoes, peas, rapeseeds, soybeans and vegetable oils using ion-pair high-performance liquid chromatography (HPLC) with an ultraviolet detector after extracting a substance from an analyzed sample with diluted sulfuric acid upon boiling, purification of the extract, and concentration of the substance by ion-exchange chromatography on a column with Dowex 50Wx8 cation exchange resin, as well as additional purification on pat solid-phase C18 Sep Pak extraction. The authors reached the lower limits for the quantitative determination of diquat in potato tubers — 0.025 mg/kg, soybean, rape, sunflower, pea — 0.05 mg/kg, vegetable oils — 0.05 mg/kg.

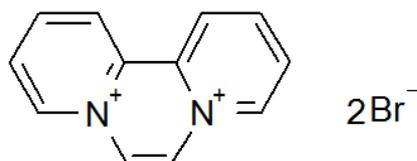
**Keywords:** dipyridyl, diquat, residual amounts, ion-pair high-performance liquid chromatography, ion-exchange chromatography.

**Введение**

На сегодняшний день одним из ключевых приемов технологии возделывания подсолнечника, картофеля, бобовых, зерновых и других культур стала десикация (подсушивание) вегетативной массы. Широкое применение для этих целей получили препараты на основе солей дипиридилия, представителем которых является дикват. Препараты на его основе используются как гербициды сплошного действия для уничтожения сорняков, так и в качестве дефолиантов (удаление листьев). В пестицидных препаратах дикват присутствует в виде диквата дибромида, который состоит из дикват-иона и двух атомов брома, при этом активной частью соли является дикват-ион.

Химическое наименование диквата дибромида по ИЮПАК -

1,1 – этилен-2,2 – дипиридилий дибромид



Химически чистый дикват дибромид – гигроскопическое белое кристаллическое вещество с температурой разложения 300<sup>0</sup>С. Коэффициент распределения н-октанол/вода:  $K_{OW} \log P = -4,60$ . Хорошо растворим в воде (700 г/л), плохо в спиртах и практически нерастворим в неполярных органических растворителях [2].

Вещество стабильно в нейтральном и кислом растворах, но легко гидролизуеться в щелочной среде. Разлагается под действием УФ-облучения ( $DT_{50}$  менее недели). Сильно связывается почвами и быстро разрушается почвенными микроорганизмами ( $DT_{50}$  не адсорбированного диквата менее недели).

Изучение динамики остаточных количеств диквата в растительной продукции показало, что он практически не поступает в плоды, благодаря уникальному свойству моментальной инактивации при попадании в почву (ионный обмен) и не всасывается корнями растений, что очень важно при применении дипиридила на овощных и зерновых культурах, растительных маслах [9].

Дикват отнесен ко 2 классу опасности по раздражающему действию на кожу по гигиенической классификации пестицидов [12], является сильным раздражителем слизистых оболочек глаз и слабым аллергеном. Показатель острой дермальной токсичности диквата дибромида ( $LD_{50}$ ) для крыс составляет 400 мг/кг [2], что обуславливает опасность вещества для здоровья человека во время сельскохозяйственного применения. Для контроля безопасности растительной и сельскохозяйственной продукции установлены максимально допустимые уровни (МДУ) диквата в горохе и бобах сои – 0,2 мг/кг, в семенах подсолнечника – 0,5 мг/кг, в подсолнечном, соевом и рапсовом масле – 0,1 мг/кг, картофеле – 0,05 мг/кг, ВМДУ в семенах рапса – 2,0 мг/кг [3].

Цель настоящей работы состояла в изучении особенностей определения остаточных количеств диквата в растительной продукции и продуктах переработки для контроля гигиенической безопасности продукции в соответствии с установленными гигиеническими нормативами с использованием ион-парной высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ).

Ранее для измерения уровней диквата дибромида в почве, клубнях картофеля, а также воде и молоке использовался спектрофотометрический метод. Метод основан на осаждении белков молока трихлоруксусной кислотой, извлечении диквата из фильтрата и воды с помощью катионита КУ-2, элюировании из катионита насыщенным водным раствором хлорида аммония и фотометрическом определении пестицида после восстановления гидросульфитом натрия. Этот метод обеспечивает нижний предел определения вещества в пробе воды и почвы – 0,02 мг/дм<sup>3</sup>, в молоке, картофеле – 0,4 мг/дм<sup>3</sup> [4], [5], [13].

Расширение сферы применения обусловило потребность в методах аналитического контроля для гороха, сои, рапса, подсолнечника.

## Материалы и методы

### Объекты исследования

В качестве объектов исследования использовали образцы картофеля, семян гороха, сои, рапса, подсолнечника, выращенных в различных регионах Российской Федерации с применением для целей десикации дикват-содержащих препаратов [1].

Использованы аналитический стандартный образец диквата дибромида с содержанием 50,9% катиона диквата (Sigma-A ldrich, № по каталогу 45422-250MG-R (N-118-16), вода дистиллированная по ГОСТ Р 58144-18, серная кислота по ГОСТ 4204-77, кислота соляная по ГОСТ 3118-77, гидроокись натрия ГОСТ 4328-77, динатриевая соль этилендиаминтетрауксусной кислоты (Трилон Б) по ГОСТ 10652-73, диэтиламин по ГОСТ 9875-88 (свежеперегнаный), ацетонитрил, ортофосфорная кислота квалификации для ВЭЖХ, октансульфонат натрия, изопропиловый спирт, хлорид натрия, хлорид аммония фирмы Panreac (Испания), метанол фирмы J.T. Baker (США), катионообменная смола Дауэкс 50 (50-100 меш) в Na форме фирмы Серва (Германия), картриджи для твердофазной экстракции с C18 Set Pak (фирмы Waters, № по каталогу WAT 051910, США).

Основной раствор диквата дибромида с концентрацией диквата (катиона диквата) 100 мкг/см<sup>3</sup> и раствор для внесения в модельные образцы картофеля, моркови, лука, гороха, семян рапса и подсолнечника с концентрацией 10 мкг/см<sup>3</sup> были приготовлены в насыщенном растворе хлорида аммония, для растительных масел- раствор для внесения 10 мкг/см<sup>3</sup> был приготовлен на основе смеси 2,5 % раствора хлорида аммония и изопропанола в соотношении (1:9, объему). Рабочие растворы для калибровки с концентрациями диквата 0,05, 0,1, 0,25, 0,5 и 1,0 мкг/см<sup>3</sup> были приготовлены в насыщенном растворе хлорида аммония. Растворы хранили при комнатной температуре в темноте в течение 12 месяцев.

*Пробоподготовка образцов.* Образцы измельченных проб картофеля массой 100 г; зерна гороха, семян рапса, сои, подсолнечника и растительных масел массой 50 г помещали в круглодонную колбу вместимостью 2000 см<sup>3</sup> с добавлением 400- 450 см<sup>3</sup> дионизованной воды. Осторожно приливали 15 см<sup>3</sup> концентрированной серной кислоты и кипятили 5 часов, охлаждали (для растительных масел: охлажденный раствор переносили в делительную воронку объемом 1000 см<sup>3</sup>, нижний водный слой отделяли и переносили в химический стакан вместимостью 2000 см<sup>3</sup>), суспензию фильтровали через бумажный фильтр (в 2 слоя) на воронке Бюхнера под вакуумом с последующей промывкой осадка на фильтре дистиллированной водой дважды по 100 см<sup>3</sup>. Фильтрат (образцов растительной продукции и масла) переносили в химический стакан вместимостью 2 000 см<sup>3</sup>, добавляли твердый гидроксид натрия или 5% раствор этилендиаминтетрауксусной кислоты с контролем pH в диапазоне 6-7 с помощью индикаторной бумаги. Раствор снова фильтровали через бумажный фильтр «красная лента» на воронке Бюхнера, промывали 100 см<sup>3</sup> дистиллированной воды, общий объем раствора доводили до 1000 см<sup>3</sup>.

Далее проводили очистку экстракта на колонке с катионообменной смолой (длиной 25 см, внутренним диаметром 10 мм). Для облегчения введения пробы в колонку раствор охлаждали в холодильнике, для поддержания необходимой скорости элюирования (5 см<sup>3</sup>/мин) использовали вакуум. После введения пробы колонку последовательно промывали 25 см<sup>3</sup> воды, 50 см<sup>3</sup> 2 н хлороводородной кислоты, 25 см<sup>3</sup> воды, 100 см<sup>3</sup> 2,5 % раствора хлорида аммония, 25 см<sup>3</sup> воды. Дикват элюировали из колонки 50 см<sup>3</sup> насыщенного раствора хлорида аммония со скоростью 1 см<sup>3</sup>/мин в мерную колбу вместимостью 50 см<sup>3</sup>.

Для дополнительной очистки проб (семян сои, рапса, подсолнечника, гороха, растительных масел) перед хроматографированием использовали патроны для твердофазной экстракции C18 Set Pak, для этого аликвоту

раствора объемом 10 см<sup>3</sup> (1/5 часть от 50 см<sup>3</sup>) пропускали через патрон со скоростью 10 см<sup>3</sup>/мин, при этом первые 5 см<sup>3</sup> элюата отбрасывали, вторую порцию 5 см<sup>3</sup> собирали в градуированную пробирку и анализировали [6], [7], [8].

*Условия хроматографирования.*

Измерение уровней диквата в образцах проведено с применением жидкостного хроматографа фирмы «Waters», модель «BRIZE» (США) с ультрафиолетовым детектором, рабочая длина волны 310 нм, колонка (длиной 250 мм, внутренним диаметром 2,1 мм), содержащая Spherisorb S5 ODS 2 (5 мкм), подвижная фаза: ацетонитрил - вода (19:81, по объему) + 0,1% (вес/объем) 1-октансульфоната натрия + 1,0% (по объему) диэтиламина + 1,0% (по объему) ортофосфорной кислоты, скорость потока 0,3 см<sup>3</sup>/мин. Ориентировочное время выхода диквата: 4,7 – 5,3 мин. Хроматографируемый объем – 20 мм<sup>3</sup>. Линейный диапазон детектирования 1 – 20 нг.

### Результаты

Разработанные методики определения остаточных количеств диквата в картофеле, семенах гороха, рапса, сои и растительных маслах, несмотря на сложную и длительную пробоподготовку, основанную на горячей экстракции разбавленной серной кислотой с последующей очисткой и концентрированием вещества на колонке с катионообменной смолой и дополнительной очистке на картридже C18 Sep Pak, позволили получить надежные, воспроизводимые результаты.

Линейная зависимость площади хроматографического пика (S, мВ\*с) от концентрации диквата построена в диапазоне концентраций 0,05-1,0 мкг/см<sup>3</sup>, выражается линейным уравнением  $S = 4,36 \cdot 10^5 \cdot C - 2,78 \cdot 10^3$  (коэффициент корреляции 0,99955), соотношение сигнал-шум на пределе обнаружения 10:1. Для проверки эффекта матрицы проведен анализ холостых реагентных и матричных образцов, при времени удерживания диквата сигналы не отмечены.

Достигнутый нижний предел количественного определения остаточных количеств диквата в клубнях картофеля – 0,025 мг/кг, семенах сои, рапса, подсолнечника, горохе – 0,05 мг/кг, растительных маслах – 0,05 мг/кг. Пересчет действующего вещества проведен по дикват-иону.

Методы валидированы на определение остаточных количеств диквата в образцах семян и масла сои, рапса, подсолнечника, семян гороха в диапазоне концентраций: 0,05 – 1,0 мг/кг с внесением действующего вещества на уровне нижнего предела количественного определения (0,05 мг/кг) и 10-ти пределов количественного определения (0,5 мг/кг); для картофеля в диапазоне концентраций: 0,025 – 0,5 мг/кг с внесением действующего вещества на уровне нижнего предела количественного определения (0,025 мг/кг) и 10-ти пределов количественного определения (0,25 мг/кг).

По результатам валидации методик, выполненных в соответствии с рекомендациями международного документа [11] рассчитаны средние величины извлечения диквата из образцов: семян сои – 78 %; масла сои – 94%; семян рапса – 85 %; масла рапса – 91 %; семян подсолнечника – 82,5 %; масла подсолнечника – 87%; клубней картофеля – 97 %; гороха – 86 %, среднее квадратичное отклонение не превышает 20 %.

Исходя из физико-химических свойств диквата дибромида, в процессе пробоподготовки использована дистиллированная вода в больших количествах. Применение катионообменной смолы в колоночной хроматографии способствует извлечению из воды диквата катионита, по которому ведется количественный расчет. Элюирование диквата с колонки осуществлено насыщенным раствором хлорида аммония, обладающего кислой реакцией.

Для идентификации диквата применена ион-парная хроматография, использование которой накладывает свои особенности на обращение с хроматографической колонкой. Рекомендуется ежедневно после завершения работы промывать колонку не менее 30 мин смесью растворителей, состоящей из метанола и воды в объемном соотношении 9:1, затем водой. Нежелательно оставлять на ночь в хроматографической системе подвижную фазу, содержащую комплекс ион-парных реагентов, ежедневно перед началом работы до анализа калибровочного стандарта ввести в инжектор насыщенный раствор хлорида аммония. Эту операцию необходимо проводить в течение рабочего дня после 5-ти вводов аналитических образцов или калибровочных растворов. После осуществления 5-6-ти вводов образцов нужно анализировать аналитический стандарт, для подтверждения того, что хроматографическая система находится в равновесии.

### Обсуждение результатов

Надежность количественной оценки содержания остаточных количеств пестицидов в сложных матрицах, к которым относятся пищевые продукты, зависит от обоснованной и адекватной пробоподготовки. Использование ионообменной колоночной хроматографии извлечения диквата из первичного экстракта (разбавленной серной кислотой) и дополнительной очистке экстракта отдельных матриц с применением для твердофазной экстракции патронов C18 Set Pak.

Существующий современный подход для извлечения пестицидов по технологии QuEChERS, обладающей рядом преимуществ: быстрота, простота, дешевизна, эффективность, надежность, безопасность [10] не может быть использован при определении остаточных количеств высокополярного соединения катиона дипиридила, так как вещество практически не растворимо в ацетонитриле, устойчиво связывается с матрицей, тем самым препятствуя извлечению в нейтральной среде.

Разработанные методы были использованы при изучении динамики разложения диквата дибромида в образцах картофеля, зерна гороха, семян рапса, сои, подсолнечника, а также продуктах переработки продукции – растительных маслах при применении препаратов в качестве десикантов. В регламентируемые сроки отбора продукции (срок ожидания 7 - 12 дней после применения препаратов [1]) остаточные количества диквата не превышали установленные величины МДУ для изучаемых культур, соответствовали показателям безопасности.

### Выводы

1. Для получения достоверных результатов определения остаточных количеств диквата (в виде диквата дибромида) в растительной продукции и продуктах ее переработки использованы аналитически обоснованные приемы пробоподготовки и количественной идентификации.

2. Нижние пределы количественного определения диквата в клубнях картофеля, семенах сои, рапса, подсолнечника, горохе, растительных маслах соответствуют установленным величинам МДУ в исследуемых продуктах, полнота извлечения варьруется по матрицам в диапазоне 78 - 97 %.

**Конфликт интересов**

Не указан.

**Conflict of Interest**

None declared.

**Список литературы / References**

1. Справочник пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории Российской Федерации. – М.: Листерра, 2019. – 872 с.
2. The Pesticide Manual 18<sup>th</sup> Edition, Turner J.A., ed. Alton: BCPS; 2015.
3. ГН 1.2.3539-18. Гигиенические нормативы содержания пестицидов в объектах окружающей среды (перечень). (Утв. Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации. Постановление от 10.05.2018, № 33).
4. Клисенко М.А. Методы определения микроколичеств пестицидов в продуктах питания, кормах и внешней среде / Клисенко М.А., Калинина А.А., Новикова К.Ф. и др. Справочник: в 2 т. Т. 1. – М.: Колос, 1992. – 567 с.
5. Методические указания по фотометрическому определению диквата в воде, молоке, № 2418-81 от 06.08.1981 г. (Методические указания по определению микроколичеств пестицидов в продуктах питания, кормах и внешней среде, Т. 2, – М., 1992. - С. 28 – 30)
6. Определение остаточных количеств диквата в моркови, луке, семенах и масле сои методом высокоэффективной жидкостной хроматографии: МУК 4.1.1945 - 05, Утв. 18.01.2005 г. (Сборник методических указаний. Определение остаточных количеств пестицидов в пищевых продуктах, сельскохозяйственном сырье и объектах окружающей сред, - М., 2009. - С. 44-56).
7. Методические указания по определению остаточных количеств диквата в зерне гороха, семенах рапса и подсолнечника, растительных маслах методом высокоэффективной жидкостной хроматографии: МУК 4.1.2350 - 08, Утв. 18.05.2008 г. (Сборник методических указаний. Определение остаточных количеств пестицидов химических веществ в продуктах питания и сельскохозяйственной продукции, – М., 2008. - С. 28 - 30).
8. Методические указания по определению остаточных количеств диквата в клубнях картофеля методом высокоэффективной жидкостной хроматографии: МУК 4.1. 2070-06, Утв. 05.05.2006 г. (Сборник методических указаний. Определение остаточных количеств пестицидов в пищевых продуктах, сельскохозяйственном сырье и объектах окружающей среды, - М., 2009. - С. 88-98).
9. Тутельян В.А. Качество и безопасность пищевой продукции: современные аспекты / Тутельян В.А., Хотимченко С.А. // Гигиена, токсикология, профпатология: традиции и современность: Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием / Под ред. доктора медицинских наук, профессора А.Ю. Поповой, академика РАН, профессора В.Н. Ракицкого. – 2016. - С. 242-248.
10. European Committee for Standardization (CEN): Determination of pesticide residues using GC-MS(/MS) and/or LC-MS/MS following acetonitrile extraction/partitioning and cleanup by dispersive SPE-QuEChERS-method: CEN/TC 275, prEN 1556662. - 2007. – URL: [https://FP417\\_1\\_3\\_undgave\\_engelsk\\_version\(1\).pdf/](https://FP417_1_3_undgave_engelsk_version(1).pdf/) (Дата обращения: 27.11.2019)
11. Guidance document on analytical quality control and method validation procedures for pesticides residues analysis in food and feed: EC № SANTE / 11813/2017. 21-22 November 2017. rev.0. EUROPEAN COMMISSION DIRECTORATE GENERAL FOR HEALTH AND FOOD SAFETY. - URL: [//ec.europa.eu/food/sites/food/files/plant/docs/pesticides\\_mrl\\_guidelines\\_wrkdoc\\_2017-11813.pdf](http://ec.europa.eu/food/sites/food/files/plant/docs/pesticides_mrl_guidelines_wrkdoc_2017-11813.pdf) (дата обращения 27.11.2019).
12. Гигиенические требования к безопасности процессов испытаний, хранения, перевозки, реализации, применения, обезвреживания и утилизации пестицидов и агрохимикатов. СанПиН 1.2.2584-10 (утв. Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 2003. Постановление от 2 марта 2010 года N 17).
13. Методические указания по определению остаточных количеств диквата в почве и клубнях картофеля спектрофотометрическим методом, МУК.4.1.1410-03 (Сборник методических указаний. Определение остаточных количеств пестицидов в пищевых продуктах, сельскохозяйственном сырье и объектах окружающей среды, вып. 3 часть 6. - М., 2005. - С. 25-37).

**Список литературы на английском языке/ Referenes in English**

1. Spravochnik pesticidov i agrohimiakatov, razreshennyh k primeneniyu na territorii Rossijskoj Federacii [Reference book of pesticides and agrochemicals permitted for use on the territory of the Russian Federation]. - М.: Listerra, 2019. - 872 p. [in Russian]
2. The Pesticide Manual 18<sup>th</sup> Edition [The Pesticide Manual 18<sup>th</sup> Edition], Turner J.A., ed. Alton: BCPS; 2015.
3. GN 1.2.3539-18. Gigenicheskie normativy soderzhaniya pesticidov v ob"ektah okruzhayushchej sredy (perechen'). (Utv. Glavnym gosudarstvennym sanitarnym vrachom Rossijskoj Federacii. Postanovlenie ot 10.05.2018, № 33). [GN 1.2.3539-18. Hygienic standards for the content of pesticides in environmental objects (list). (Approved by the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation. Resolution of 05/10/2018, No. 33)]. [in Russian]
4. Klisenko M.A. Metody opredeleniya mikrokolichestv pesticidov v produktah pitaniya, kormah i vneshnej srede [Methods for the determination of trace amounts of pesticides in food, feed and the environment] / Klisenko M.A., Kalinina A.A., Novikova K.F. et. al. Reference: in 2 vols. V. 1. - М.: Kolos, 1992. - 567 p. [in Russian]
5. Metodicheskie ukazaniya po fotometricheskomu opredeleniyu dikvata v vode, moloke, № 2418-81 ot 06.08.1981 g. (Metodicheskie ukazaniya po opredeleniyu mikrokolichestv pesticidov v produktah pitaniya, kormah i vneshnej srede [Guidelines for the photometric determination of diquat in water, milk, No. 2418-81 dated 08/06/1981 (Guidelines for the determination of trace amounts of pesticides in food, feed and the environment)], V. 2, - М., 1992. - P. 28 - 30). [in Russian]

6. Opredelenie ostatochnyh količestv dikvata v morkovi, luke, semenah i masle soi metodom vysokoeffektivnoj zhidkostnoj hromatografii: MUK 4.1.1945 - 05, Utv. 18.01.2005 g. (Sbornik metodicheskikh ukazanij. Opredelenie ostatochnyh količestv pesticidov v pishčevykh produktah, sel'skohozyajstvennom syr'e i ob'ektah okružhayushchej sred [Determination of residual diquat in carrots, onions, seeds and soybean oil by high performance liquid chromatography: MUK 4.1.1945 - 05, Approved. January 18, 2005 (Collection of guidelines. Determination of residual amounts of pesticides in food products, agricultural raw materials and environmental objects)] - M., 2009. - P. 44-56). [in Russian]

7. Metodicheskie ukazaniya po opredeleniyu ostatochnyh količestv dikvata v zerne goroha, semenah rapsa i podsolnechnika, rastitel'nyh maslah metodom vysokoeffektivnoj zhidkostnoj hromatografii: MUK 4.1.2350 - 08, Utv. 18.05.2008 g. (Sbornik metodicheskikh ukazanij. Opredelenie ostatochnyh količestv pesticidov himicheskikh veshchestv v produktah pitaniya i sel'skohozyajstvennoj produkcii [Guidelines for the determination of residual amounts of diquat in pea grain, rapeseed and sunflower seeds, vegetable oils by high performance liquid chromatography: MUK 4.1.2350 - 08, Approved. 05/18/2008 (Collection of guidelines. Determination of residual amounts of pesticides of chemicals in food and agricultural products)] - M., 2008. - P. 28 - 30). [in Russian]

8. Metodicheskie ukazaniya po opredeleniyu ostatochnyh količestv dikvata v klubnyah kartofelya metodom vysokoeffektivnoj zhidkostnoj hromatografii: MUK 4.1. 2070-06, Utv. 05.05.2006 g. (Sbornik metodicheskikh ukazanij. Opredelenie ostatochnyh količestv pesticidov v pishčevykh produktah, sel'skohozyajstvennom syr'e i ob'ektah okružhayushchej sredy [Guidelines for the determination of residual amounts of diquat in potato tubers by high performance liquid chromatography: MUK 4.1. 2070-06, Approved 05.05.2006 (Collection of guidelines. Determination of residual amounts of pesticides in food products, agricultural raw materials and environmental objects)] - M., 2009. - P. 88-98). [in Russian]

9. Tutelyan V.A. Kachestvo i bezopasnost' pishchevoj produkcii: sovremennye aspekty [Quality and safety of food products: modern aspects] / Tutelyan V.A., Khotimchenko S.A. // Hygiene, toxicology, occupational pathology: traditions and modernity: Materials of the All-Russian scientific-practical conference with international participation / Ed. Doctors of medical sciences, professors A.Yu. Popova, Academician of the Russian Academy of Sciences, Professor V.N. Rakitsky. - 2016. - P. 242-248. [in Russian]

10. European Committee for Standardization (CEN): Determination of pesticide residues using GC-MS (/ MS) and / or LC-MS / MS following acetonitrile extraction / partitioning and cleanup by dispersive SPE-QuEChERS-method: CEN / TC 275, prEN 1556662. - 2007. - URL: [https://FP417\\_1\\_3\\_undgave\\_engelsk\\_version\(1\).pdf/](https://FP417_1_3_undgave_engelsk_version(1).pdf/) (Дата обращения: 27.11.2019)

11. Guidance document on analytical quality control and method validation procedures for pesticides residues analysis in food and feed: EC No. SANTE / 11813/2017. 21-22 November 2017. rev.0. EUROPEAN COMMISSION DIRECTORATE GENERAL FOR HEALTH AND FOOD SAFETY. - URL: [//ec.europa.eu/food/sites/food/files/plant/docs/pesticides\\_mrl\\_guidelines\\_wrkdoc\\_2017-11813.pdf](http://ec.europa.eu/food/sites/food/files/plant/docs/pesticides_mrl_guidelines_wrkdoc_2017-11813.pdf) (accessed: 27.11.2019).

12. Gigienicheskie trebovaniya k bezopasnosti processov ispytaniy, hraneniya, perevozki, realizacii, primeneniya, obezvrezhivaniya i utilizacii pesticidov i agrohimičatov. SanPiN 1.2.2584-10 (utv. Glavnym gosudarstvennym sanitarnym vrachom Rossijskoj Federacii 2003. Postanovlenie ot 2 marta 2010 goda N 17). [Hygienic requirements for the safety of testing, storage, transportation, implementation, application, neutralization and disposal of pesticides and agrochemicals. SanPiN 1.2.2584-10 (UTV. Chief state sanitary doctor of the Russian Federation 2003. Resolution of March 2, 2010 N 17)]. [in Russian]

13. Metodicheskie ukazaniya po opredeleniyu ostatochnyh količestv dikvata v pochve i klubnyah kartofelya spektrofotometricheskim metodom, MUK.4.1.1410-03 (Sbornik metodicheskikh ukazanij. Opredelenie ostatochnyh količestv pesticidov v pishčevykh produktah, sel'skohozyajstvennom syr'e i ob'ektah okružhayushchej sredy, vyp. 3 chast' 6 [Guidelines for the determination of residual amounts of Diquat in soil and potato tubers spectrophotometric method, FLOUR.4.1.1410-03 (Collection of guidelines. 4.1.Control method. Chemical factor. Determination of pesticide residues in food, agricultural raw materials and environmental objects, vol. 3 part 6. - M., 2005. - P. 25-37)]. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.90.12.038>

## ФОРМИРОВАНИЕ РЕЛЬЕФА НА ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИЭТИЛЕНА ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ С ЖЕСТКИМИ ПОКРЫТИЯМИ

Научная статья

Ярышева Л.М.<sup>1</sup>, Ярышева А.Ю.<sup>2\*</sup>, Волынский А.Л.<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

\* Корреспондирующий автор (alyonusha[at]gmail.com)

### Аннотация

В результате плазменной обработки пленок полиэтилена высокой плотности (ПЭВП) и напыления металла (золота) на поверхность пленок ПЭВП были получены образцы нанокпозиционных материалов в виде гибкой полимерной подложки с жестким покрытием. При деформировании полученных материалов происходит фрагментация жесткого покрытия с образованием на поверхности полимера уникального упорядоченного рельефа. С помощью сканирующей электронной микроскопии определены параметры полученного рельефа в зависимости от условий вытяжки и последующей усадки деформированных наноккомпозитов. Предлагаемый подход может найти применение как способ модификации поверхностных свойств полимеров.

**Ключевые слова:** полиэтилен высокой плотности, жесткое покрытие, плазменная обработка, напыление металлов, металлические покрытия на полимерах, наноккомпозит.

## PATTERN FORMATION ON SURFACE OF HIGH-DENSITY POLYETHYLENE

Research article

Yarysheva L.M.<sup>1</sup>, Yarysheva A.Yu.<sup>2\*</sup>, Volynsky A.L.<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

\* Corresponding author (alyonusha[at]gmail.com)

### Abstract

The authors obtained nanocomposite materials in the form of a flexible polymer substrate with a hard coating as a result of plasma treatment of high-density polyethylene (HDPE) films and metal (gold) deposition on the surface of HDPE films. Fragmentation of the hard coating takes place with the formation of a unique ordered relief on the polymer surface during deformation of the obtained materials. Using scanning electron microscopy, the parameters of the obtained relief are determined depending on the drawing conditions and subsequent shrinkage of the deformed nanocomposites. The proposed approach may be applied as a method of modifying the surface properties of polymers.

**Keywords:** high-density polyethylene, hard coating, plasma treatment, metal spraying, metal coatings on polymers, nanocomposite.

### Введение

В настоящее время широкое использование находят материалы с жесткими нанометровыми покрытиями на поверхности, такими как металлы или оксиды металлов. На примере подобных композиционных материалов, получивших название «жесткое покрытие на гибкой подложке», решается целый ряд научных и практических задач, поскольку деформирование или усадка таких материалов сопровождаются фрагментацией покрытия и образованием регулярного микрорельефа на поверхности полимерной пленки. Придание шероховатости и создание микрорельефа на поверхности полимеров придает им новые функциональные свойства и позволяет использовать их в качестве гибких электропроводящих материалов, подложек с контролируемой смачиваемостью и адгезией для использования в медицине и биохимии, материалов с контролируемым рельефом для предотвращения обледенения и создания самоочищающихся поверхностей.

Исследование параметров фрагментов разрушения и микрорельефа, образующихся на поверхности полимерных пленок с жесткими нанометровыми покрытиями при их растяжении или усадке, позволило визуализировать структурные перестройки, происходящие в полимере при деформировании, и судить о механизме деформации, а также о деформационно-прочностных свойствах материалов в нанослоях [10], [11].

Вместе с тем существуют и другие способы модификации поверхности полимеров. Одним из таких способов является обработка полимеров холодной плазмой, которая приводит к изменению химической природы полимеров в поверхностном слое [12].

Целью данной работы было исследование структурных перестроек в поверхностном слое полиэтилена высокой плотности (ПЭВП) с металлическим покрытием и химически модифицированным поверхностным слоем, сформированным под действием плазменной обработки.

### Методы и принципы исследования

В качестве подложки для создания композитов, состоящих из жесткого нанометрового покрытия и гибкого основания, был выбран кристаллический ПЭВП с молекулярной массой 200 кДа и степенью кристалличности 60%. В качестве металлического покрытия было выбрано золото, которое наносили методом ионно-плазменного напыления на поверхность пленки ПЭВП с помощью установки «Eiko IB-3». Напыление происходило при токе 2 мА в течение 3 минут. Толщина пленок ПЭВП составляла 25 мкм, толщина напыленного слоя золота 9 нм. На этой же установке в режиме травления осуществляли обработку поверхности полимерной пленки холодной плазмой, используя те же условия обработки, что и в случае напыления металла. В результате обработки был получен наноккомпозит ПЭВП с химически модифицированным поверхностным слоем. Растяжение композитов осуществляли при комнатной

температуре с помощью динамометра «Instron-1122» со скоростью 10 мм/мин. Размеры рабочей части деформируемого образца составляли 4×10 мм. Структуру поверхности пленок исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа «Hitachi S-520». Для определения величины средних размеров фрагментов разрушения покрытия и значений периода микрорельефа из электронных микрофотографий использовали программу «Femtoscan Online». Для определения ширины фрагментов разрушения в каждом случае измерялось не менее 100 фрагментов и вычислялась их средняя величина. Как было установлено, дальнейшее увеличение числа фрагментов не меняет вид распределения и определяемую среднюю ширину фрагментов.

### Основные результаты

Исследование механических свойств исходного ПЭВП, нанокompозитов ПЭВП с тонким нанометровым слоем золота и с химически модифицированным поверхностным слоем при растяжении на воздухе представлено на рис. 1.

Как видно из данных, представленных на рис. 1, по сравнению с исходным ПЭВП растяжение нанокompозитов ПЭВП как со слоем золота, так и с химически модифицированным плазмой поверхностным слоем происходит при более высоком уровне напряжения. Это свидетельствует о том, что на поверхности ПЭВП образуется более жесткий поверхностный слой как при ионно-плазменном напылении золотого покрытия, так и за счет плазменной обработки.

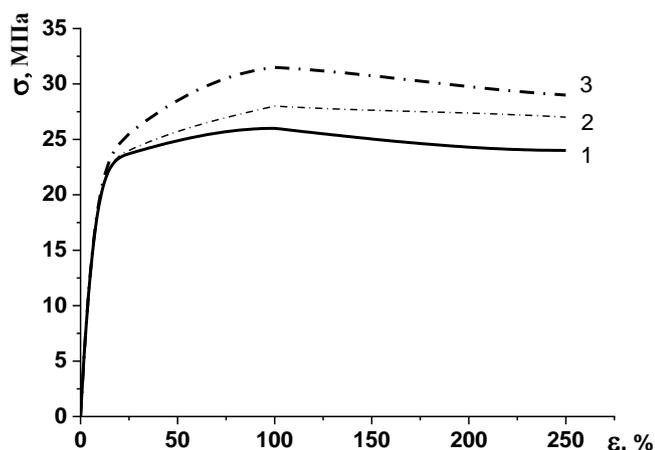


Рис. 1 – Динамометрические кривые растяжения исходного ПЭВП (1), нанокompозита с химически модифицированным поверхностным слоем после плазменной обработки (2) и нанокompозита ПЭВП со слоем золота (3)

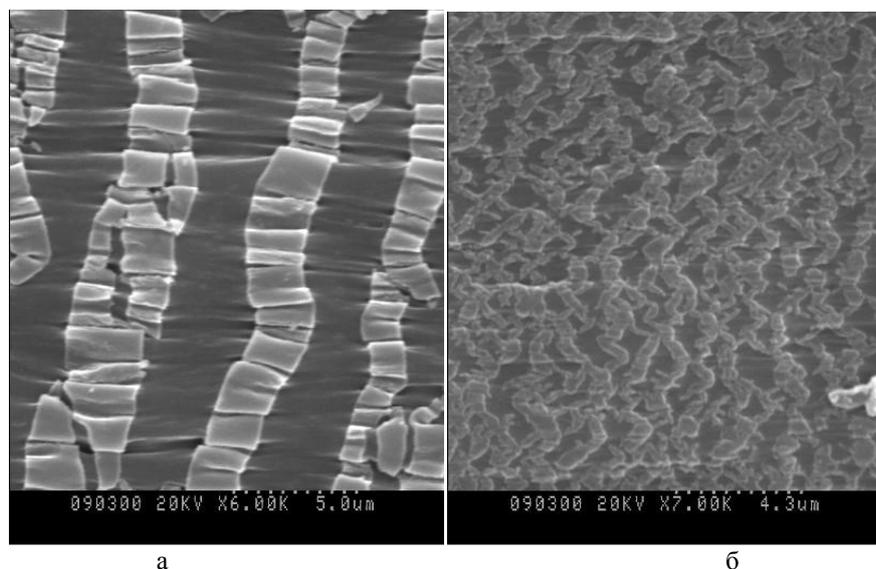


Рис. 2 – Микрофотографии поверхности образцов после деформирования на 250%, ПЭВП с золотым покрытием (а), ПЭВП с химически модифицированным после обработки плазмой слоем (б)

На рис. 2 (а, б) представлены микрофотографии поверхности ПЭВП с металлическим покрытием и с химически модифицированным слоем полимера после их растяжения на 250% в одинаковых условиях. Видно, что слой золота на поверхности ПЭВП разрушается с образованием множества фрагментов, преимущественно расположенных перпендикулярно оси растяжения полимера. При деформировании ПЭВП с химически модифицированным слоем также происходит разрушение поверхностного слоя и образование множества фрагментов в виде сетки. Ширина фрагментов разрушения металла в нанокompозитах ПЭВП со слоем золота оказалась больше, чем ширина фрагментов, образующихся в ходе растяжения пленок ПЭВП, подвергнутых плазменной обработке, и составила соответственно 2.5

и 0.6 мкм, для нанокompозитов полученных вытяжкой на 250%. Данные по фрагментации нанокompозитов с химически модифицированным поверхностным слоем вместе с результатами по механическому отклику на деформацию растяжения, свидетельствуют, во-первых, об образовании на поверхности ПЭВП жесткого слоя в процессе плазменной обработки и, во-вторых, о его меньшей жесткости по сравнению с металлическим покрытием, нанесенным методом ионно-плазменного напыления.

После растяжения до необходимой степени вытяжки и освобождения пленок из зажимов растягивающего устройства происходит их значительная усадка по длине образца. Например, для образца, деформированного на 250%, усадка составила около 50%. В связи с этим в работе была предложена и отработана методика отжига деформированной полимерной пленки непосредственно в зажиме в изометрических условиях. Чтобы избежать усадки, деформированные образцы подвергали термической обработке в течение 30 минут при температуре 120°C. Для таких образцов усадка практически отсутствует. Механизм предотвращения усадки деформированного ПЭВП состоит в дополнительной кристаллизации полимера и релаксации внутренних напряжений в пленке.

Для нанокompозитов ПЭВП с золотом с малой степенью вытяжки (25%) отжиг не изменяет вид фрагментов разрушения на поверхности пленок. Для образцов с большими степенями вытяжки наблюдается искажение наблюдавшейся ранее картины фрагментации и появление фрагментов, направленных под углом к оси растяжения, что, вероятно, связано со сдвиговыми напряжениями, обусловленными боковой контракцией образцов в процессе отжига.

Исследования по структуре поверхностного слоя нанокompозитов ПЭВП – золото в зависимости от степени вытяжки показали, что ширина фрагментов разрушения практически не изменяется при увеличении степени вытяжки. При этом параметры структуры оказались одинаковыми как до, так после отжига нанокompозита, то есть усадка полимера не вносит существенного вклада в измеряемую ширину фрагментов. Независимость ширины фрагментов поверхностного слоя нанокompозитов от степени растяжения свидетельствует о том, что в этой области деформаций подложка из полиэтилена практически не способна передавать покрытие напряжение, достаточное для его дальнейшего разрыва.

#### Заключение

Полученные в работе данные по фрагментации поверхности и результаты по механическому отклику на деформацию растяжения свидетельствуют об образовании нанокompозитов типа «жесткое покрытие на гибкой полимерной подложке» как в результате плазменной обработки, так и при напылении металлического нанослоя на поверхность ПЭВП. При деформировании полученных нанокompозитов происходит фрагментация жесткого покрытия с образованием на поверхности полимера уникального упорядоченного рельефа. Предлагаемый подход может найти применение как способ модификации поверхностных свойств полимеров.

#### Финансирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект №18-03-00507/18.

#### Funding

The study was funded by the Russian Foundation for Basic Research, project No 18-03-00507/18.

#### Конфликт интересов

Не указан.

#### Conflict of Interest

None declared.

#### Список литературы / References

1. Волинский А. Л. Новый подход к оценке деформационно-прочностных свойств твердых тел наноскопических размеров. / Волинский А. Л., Панчук Д. А., Моисеева С. В. и др // Известия Академии наук, серия С химическая. – 2009. – №5. – С. 1–19.
2. Volynskii A. L. Surface Phenomena in the Structural and Mechanical Behaviour of Solid Polymers. / Volynskii A. L., Bakeev N. F. // – Taylor & Francis: Boca Raton, FL, London, and New York, 2016. – 536 p. doi.org/10.1201/9781315367873
3. Volynskii A. L. Multiple cracking of rigid platinum film covering polymer substrate. / Volynskii A. L., Bazhenov S. L., Lebedeva O. V. et al. // J. Appl. Polym. Sci. – 1999. – V. 72. – P. 1267–1275.
4. Volynskii A. L. Mechanical buckling instability of thin coatings deposited on soft polymer substrates. / Volynskii A. L., Bazhenov S. L., Lebedeva O. V. et al. // J. Mater. Sci. – 2000. – V. 35. – P. 547–554. http://dx.doi.org/10.1023/A:1004707906821
5. Rodriguez-Hernandez J. Wrinkled interfaces: Taking advantage of surface instabilities to pattern polymer surfaces. / J. Rodriguez-Hernandez // Progress in Polymer Science. – 2015. – V. 42. – P. 1–41. http://dx.doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2014.07.008
6. Lin Y. Recent Progress in Preparation and Anti-Icing Applications of Superhydrophobic Coatings / Lin Y., Chen H., Wang G. // Coatings. – 2018. – V. 8. – P. 208–241. doi:10.3390/coatings8060208
7. Корнеев И. А. Создание и исследование микро- и наноструктурированных сверхгидрофобных и антиобледенительных поверхностей. / Корнеев И. А., Селезнев В. А., Принц В. Я. // Российские нанотехнологии. – 2017. – Том 12. – № 9–10. – С. 20–29.
8. Shin S. Bio-Inspired Extreme Wetting Surfaces for Biomedical Applications. / Shin S., Seo J., Han H. et al. // Materials. – 2016. – V. 9. – P. 116–142. doi:10.3390/ma9020116
9. Rogers J. A. Materials and Mechanics for Stretchable Electronics / Rogers J. A., Someya T., Huang Y. et al. // Science. – 2010. – V. 327. – P. 1603–1607.
10. Vogt B. D. Mechanical and Viscoelastic Properties of Confined Amorphous Polymers. / B. D. Vogt // J. Polym. Sci., Pt. B: Polym. Phys. – 2018. – V. 56. – P. 9–30.
11. Stafford C. M. A Buckling-based Metrology for Measuring the Elastic Moduli of Polymeric Thin Films. / Stafford C. M., Harrison C., Beers K. L. et al // Nature materials – 2004. – V. 3. – P. 545–550.

12. Drnovska H. Surface properties of polyethylene after low-temperature plasma treatment. / Drnovska H., Lapcik L., Bursikova V. et al. // *Colloid. Polym. Sci.* – 2003. – V. 281. – P. 1025–1033.

**Список литературы на английском языке / References in English**

1. Volynskii A. L. Noviy podhod k otsenke deformatsionno-prochnostnih svoystv tverdykh tel nanoskopicheskikh razmerov [A new approach to assessing the deformation-strength properties of solids of nanoscopic sizes] / Volynskii A. L., Panchuk D. A., Moiseeva S. V. et al // *Izvestia Akademii nauk, seria C himicheskaya* [News of the Academy of Sciences, series C chemical]. – 2009. – №5. – P. 1–19. [in Russian]

2. Volynskii A. L. Surface Phenomena in the Structural and Mechanical Behaviour of Solid Polymers. / Volynskii A. L., Bakeev N. F. // – Taylor & Francis: Boca Raton, FL, London, and New York, 2016. – 536 p. doi.org/10.1201/9781315367873

3. Volynskii A. L. Multiple cracking of rigid platinum film covering polymer substrate. / Volynskii A. L., Bazhenov S. L., Lebedeva O. V. et al. // *J. Appl. Polym. Sci.* – 1999. – V. 72. – P. 1267–1275.

4. Volynskii A. L. Mechanical buckling instability of thin coatings deposited on soft polymer substrates. / Volynskii A. L., Bazhenov S. L., Lebedeva O. V. et al. // *J. Mater. Sci.* – 2000. – V. 35. – P. 547–554. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1004707906821>

5. Rodriguez-Hernandez J. Wrinkled interfaces: Taking advantage of surface instabilities to pattern polymer surfaces. / J. Rodriguez-Hernandez // *Progress in Polymer Science.* – 2015. – V. 42. – P. 1–41. <http://dx.doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2014.07.008>

6. Lin Y. Recent Progress in Preparation and Anti-Icing Applications of Superhydrophobic Coatings / Lin Y., Chen H., Wang G.. // *Coatings.* – 2018. – V. 8. – P. 208–241. doi:10.3390/coatings8060208

7. Korneev I. A. Sozdanie i issledovanie mikro- i nanostrukturirovannykh sverhgidrofobnykh i antiobledenitel'nykh poverkhnostej. / Korneev I. A., Seleznev V. A., Princ V. Ja. // *Rossijskie nanotehnologii.* – 2017. – V. 12. – № 9–10. – P. 20–29. [in Russian].

8. Shin S. Bio-Inspired Extreme Wetting Surfaces for Biomedical Applications. / Shin S., Seo J., Han H. et al. // *Materials.* – 2016. – V. 9. – P. 116–142. doi:10.3390/ma9020116

9. Rogers J. A. Materials and Mechanics for Stretchable Electronics / Rogers J. A., Someya T., Huang Y. et al. // *Science.* – 2010. – V. 327. – P. 1603–1607.

10. Vogt B. D. Mechanical and Viscoelastic Properties of Confined Amorphous Polymers. / B. D. Vogt // *J. Polym. Sci., Pt. B: Polym. Phys.* – 2018. – V. 56. – P. 9–30.

11. Stafford C. M. A Buckling-based Metrology for Measuring the Elastic Moduli of Polymeric Thin Films. / Stafford C. M., Harrison C., Beers K. L. et al // *Nature materials* – 2004. – V. 3. – P. 545–550.

12. Drnovska H. Surface properties of polyethylene after low-temperature plasma treatment. / Drnovska H., Lapcik L., Bursikova V. et al. // *Colloid. Polym. Sci.* – 2003. – V. 281. – P. 1025–1033.