



ИД «Академия Естествознания»

УСПЕХИ СОВРЕМЕННОГО ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

Научный журнал

№ 12 2025



ADVANCES IN CURRENT NATURAL SCIENCES

Scientific journal

No. 12 2025



PH Academy of Natural History

Успехи современного естествознания

Научный журнал

Журнал издается с 2001 года.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство – ПИ № ФС 77-63398.

«Успехи современного естествознания» – рецензируемый научный журнал, в котором публикуются статьи обладающие научной новизной, представляющие собой результаты завершённых исследований, проблемного или научно-практического характера, научные обзоры.

Журнал включен в действующий Перечень рецензируемых научных изданий (ВАК РФ). К2.

Журнал ориентирован на профессиональных работников сельского хозяйства, экологов, научных сотрудников, специалистов в смежных областях знаний, занимающихся изучением наук о земле.

Основные научные направления: 1.6. Науки о Земле и окружающей среде, 2.8. Недропользование и горные науки, 4.1. Агрономия, лесное и водное хозяйство.

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Ледванов Михаил Юрьевич, д.м.н., профессор

Технический редактор

Доронкина Е.Н.

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ

Бизенкова Мария Николаевна, к.м.н.

Корректор

Галенкина Е.С.,

Дудкина Н.А.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

д.х.н., к.ф.-м.н., проф. **Алоев В.З.** (Нальчик); д.г.н., доцент **Андреева Е.С.** (Ростов-на-Дону); д.с.-х.н., доцент **Анищенко Л.Н.** (Брянск); д.т.н., проф. **Бейсембаев К.М.** (Караганда); д.т.н., проф. **Белозеров В.В.** (Ростов-на-Дону); д.б.н., доцент **Белоус О.Г.** (Сочи); д.г.-м.н., к.т.н., проф. **Бондарев В.И.** (Екатеринбург); д.г.-м.н., проф. **Гавришин А.И.** (Новочеркасск); д.т.н., профессор **Галкин А.Ф.** (Якутск); д.с.-х.н. **Горянин О.И.** (Самара); д.с.-х.н., доцент **Григорьев М.Ф.** (Кемерово) д.г.-м.н., проф. **Гусев А.И.** (Бийск); д.с.-х.н., проф. **Данилин И.М.** (Красноярск); д.э.н., д.б.н., проф. **Долятовский В.А.** (Ростов-на-Дону); д.х.н., проф. **Дресвянников А.Ф.** (Казань); д.с.-х.н., проф. **Залесов С.В.** (Екатеринбург); д.б.н., доцент **Захарченко А.В.** (Тюмень); д.с.-х.н., проф. **Зволинский В.П.** (Волгоград); д.г.-м.н., доцент **Копылов И.С.** (Пермь); д.с.-х.н., проф. **Костылев П.И.** (Зерноград); д.с.-х.н. **Коцарева Н.В.** (Белгород); д.с.-х.н. **Ланцева Н.Н.** (Новосибирск); д.б.н., проф. **Ларионов М.В.** (Саратов); д.ф.-м.н., проф. **Лерер А.М.** (Ростов-на-Дону); д.г.н., к.б.н., проф. **Луговской А.М.** (Москва); д.с.-х.н. **Морозова Н.И.** (Рязань); д.т.н., проф. **Мусаев В.К.** (Москва); д.с.-х.н. **Никитин С.Н.** (Ульяновск); д.с.-х.н. **Оказова З.П.** (Владикавказ); д.с.-х.н., проф. **Партоев К.** (Душанбе); д.с.-х.н., проф. **Петелько А.И.** (Мценск); д.б.н. **Сибикеев С.Н.** (Саратов); д.с.-х.н., доцент **Сокольская О.Б.** (Саратов); д.т.н., проф. **Степанов В.В.** (Санкт-Петербург); д.т.н. **Теплухин В.К.** (Октябрьский); д.с.-х.н., проф. **Титов В.Н.** (Саратов); д.с.-х.н., проф. **Тихановский А.Н.** (Салехард); д.т.н., доцент **Ульрих Е.В.** (Кемерово); д.с.-х.н., проф. **Шамишев Б.Н.** (Ош); д.т.н., проф. **Шатов А.А.** (Уфа); д.ф.-м.н., проф. **Ширапов Д.Ш.** (Улан-Удэ); д.ф.-м.н., проф. **Шугунов Л.Ж.** (Нальчик); д.г.-м.н., проф. **Юргенсон Г.А.** (Чита); д.г.н., проф. **Яковенко Н.В.** (Воронеж); д.т.н., проф. **Ямалетдинова К.Ш.** (Уфа)

ISSN 1681-7494

Электронная версия: <http://www.natural-sciences.ru>

Правила для авторов: <http://www.natural-sciences.ru/ru/rules/index>

Двухлетний импакт-фактор РИНЦ = 0,976

Пятилетний импакт-фактор РИНЦ = 0,458

Периодичность

12 номеров в год

Учредитель, издатель и редакция

ООО ИД «Академия Естествознания»

Почтовый адрес

105037, г. Москва, а/я 47

Адрес редакции и издателя

440026, обл. Пензенская, г. Пенза, ул. Московская, влд. 27

Типография

ООО «НИЦ Академия Естествознания»

410035, г. Саратов, ул. Мамонтовой, 5

E-mail

edition@rae.ru

Телефон

+7 (499) 705-72-30

Подписано в печать

30.12.2025

Дата выхода номера

30.01.2026

Формат

60х90 1/8

Усл. печ. л.

7,75

Тираж

1000 экз.

Заказ

УСЕ 2025/12

Распространяется по свободной цене

© ООО ИД «Академия Естествознания»

Advances in current natural sciences

Scientific journal

The journal has been published since 2001.

The journal is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Communications. **Certificate – PI No. FS 77-63398.**

«Advances in current natural sciences» is a peer-reviewed scientific journal that publishes articles of scientific novelty, which are the results of completed research, of a problematic or scientific-practical nature, scientific reviews.

The journal is included in the current List of peer-reviewed scientific publications (**HCC RF**). **K2.**

The journal is aimed at professional agricultural workers, environmentalists, researchers, specialists in related fields of study geosciences.

Main scientific directions: 1.6. Earth and environmental sciences, 2.8. Subsoil use and mining sciences, 4.1. Agronomy, forestry and water management.

CHIEF EDITOR

Ledvanov Mikhail Yurievich, Dr. Sci. (Medical), Prof.

Technical editor

Doronkina E.N.

EXECUTIVE SECRETARY

Bizenkova Maria Nikolaevna, Cand. Sci. (Medical)

Corrector

Galenkina E.S.,

Dudkina N.A.

EDITORIAL BOARD

D.Sc., C.Sc., Prof. **Aloev V.Z.** (Nalchik); D.Sc., Docent **Andreeva E.S.** (Rostov-on-Don); D.Sc., Docent **Anishchenko L.N.** (Bryansk); D.Sc., Prof. **Beisembaev K.M.** (Karaganda); D.Sc., Prof. **Belozеров V.V.** (Rostov-on-Don); D.Sc., Docent **Belous O.G.** (Sochi); D.Sc., C.Sc. Prof. **Bondarev V.I.** (Ekaterinburg); D.Sc., Prof. **Gavrishin A.I.** (Novocherkassk); D.Sc., Prof. **Galkin A.F.** (Yakutsk); D.Sc. **Goryanin O.I.** (Samara); D.Sc., Docent **Grigoriev M.F.** (Kemerovo); D.Sc., Prof. **Gusev A.I.** (Biysk); D.Sc., Prof. **Danilin I.M.** (Krasnoyarsk); D.Sc., Prof. **Dolyatovsky V.A.** (Rostov-on-Don); D.Sc., Prof. **Dresvyannikov A.F.** (Kazan); D.Sc., Prof. **Zalesov S.V.** (Ekaterinburg); D.Sc., Docent **Zakharchenko A.V.** (Tyumen); D.Sc., Prof. **Zvolinsky V.P.** (Volgograd); D.Sc., Docent **Kopylov I.S.** (Perm); D.Sc., Prof. **Kostylev P.I.** (Zernograd); D.Sc. **Kotsareva N.V.** (Belgorod); D.Sc. **Lantseva N.N.** (Novosibirsk); D.Sc., Prof. **Larionov M.V.** (Saratov); D.Sc., Prof. **Lerer A.M.** (Rostov-on-Don); D.Sc., C.Sc. Prof. **Lugovskoy A.M.** (Moscow); D.Sc. **Morozova N.I.** (Ryazan); D.Sc., Prof. **Musaev V.K.** (Moscow); D.Sc. **Nikitin S.N.** (Ulyanovsk); D.Sc. **Okazova Z.P.** (Vladikavkaz); D.Sc., Prof. **Partoev K.** (Dushanbe); D.Sc., Prof. **Petelko A.I.** (Mtsensk); D.Sc. **Sibikeev S.N.** (Saratov); D.Sc., Docent **Sokolskaya O.B.** (Saratov); D.Sc., Prof. **Stepanov V.V.** (Saint Petersburg); D.Sc. **Teplukhin V.K.** (Oktyabr'skiy); D.Sc., Prof. **Titov V.N.** (Saratov); D.Sc., Prof. **Tikhonovskiy A.N.** (Salekhard); D.Sc., Docent **Ulrich E.V.** (Kemerovo); D.Sc., Prof. **Shamshiev B.N.** (Osh); D.Sc., Prof. **Shatov A.A.** (Ufa); D.Sc., Prof. **Shirapov D.Sh.** (Ulan-Ude); D.Sc., Prof. **Shugunov L.Zh.** (Nalchik); D.Sc., Prof. **Yurgenson G.A.** (Chita); D.Sc., Prof. **Yakovenko N.V.** (Voronezh); D.Sc., Prof. **Yamaletdinova K.Sh.** (Ufa)

ISSN 1681-7494

Electronic version: <http://www.natural-sciences.ru>

Rules for authors: <http://www.natural-sciences.ru/ru/rules/index>

Impact-factor RISQ (two-year) = 0,976

Impact-factor RISQ (five-year) = 0,458

| | | | |
|---------------------------------|---|------------------------------|--------------------|
| Periodicity | 12 issues per year | | |
| Founder, publisher and editors | LLC PH Academy of Natural History | | |
| Mailing address | 105037, Moscow, p.o. box 47 | | |
| Editorial and publisher address | 440026, Penza region, Penza, Moskovskaya st., bldg. 27 | | |
| Printing house | LLC SPC Academy of Natural History 410035, Saratov, st. Mamontova, 5 | | |
| E-mail | edition@rae.ru | Telephone | +7 (499) 705-72-30 |
| Signed for print | 30.12.2025 | Number issue date | 30.01.2026 |
| Format | 60x90 1/8 | Conditionally printed sheets | 7,75 |
| Circulation | 1000 copies | Order | YCE 2025/12 |

Distribution at a free price

© LLC PH Academy of Natural History

СОДЕРЖАНИЕ

Сельскохозяйственные науки (4.1.1 Общее земледелие и растениеводство)

СТАТЬЯ

ОЦЕНКА ПРОДУКТИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ СОРТОВ ГОРОХА
ПОСЕВНОГО В УСЛОВИЯХ НИЖНЕГО ПОВОЛЖЬЯ

Калинин В.Ю., Субботин А.Г.6

Географические науки (1.6.8, 1.6.12, 1.6.13, 1.6.21)

СТАТЬЯ

РАЗВИТИЕ ТУРИЗМА И РЕКРЕАЦИИ В ХАНТЫ-МАНСКИЙСКОМ
АВТОНОМНОМ ОКРУГЕ – ЮГРЕ: ПРОСТРАНСТВЕННО-
ПЛАНИРОВОЧНЫЕ И ТРАНСПОРТНО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ

Волкова И.Н., Крылов П.М., Литвиненко Т.В., Семин И.А.12

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

ЭКОНОМИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ
ГЕОКУЛЬТУРНОГО ПРОСТРАНСТВА ТАЙМЫРА

Стрючкова Л.Н.21

Геолого-минералогические науки (1.6.3, 1.6.5, 1.6.6, 1.6.10, 1.6.12, 1.6.17, 1.6.21)

СТАТЬИ

ПРОФИЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАКРОЭЛЕМЕНТОВ В СЕРЫХ
И ТЕМНО-СЕРЫХ ПОЧВАХ ЮГА ТЮМЕНСКОЙ ОБЛАСТИ

Земцова Е.С., Якимов А.С., Токарева А.Ю., Колобов А.П., Алимова Г.С.28

КРЕМНИСТЫЕ ТЕРМАЛЬНЫЕ ВОДЫ КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЙ
РЕКРЕАЦИОННЫЙ РЕСУРС КАМЧАТСКОГО КРАЯ

Рогатых С.В., Гвозденко Т.А., Антонюк М.В., Штомпель К.В.35

Технические науки (1.6.7, 1.6.9, 1.6.16, 2.8.1, 2.8.6, 2.8.7, 2.8.9)

СТАТЬЯ

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ
КРУПНОДИСПЕРСНОГО ГРУНТА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВЛАЖНОСТИ

*Таптырова Н.И., Кравцова О.Н., Малышев А.В.,
Протодьяконова Н.А., Тимофеев А.М., Степанов А.В.*40

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЫСОКОГРАДИЕНТНОЙ МАГНИТНОЙ
СЕПАРАЦИИ: ОБЗОР МЕТОДА И АЛГОРИТМ КОМПЛЕКСНОГО ПОДХОДА

Степанов Д.В., Александрова Т.Н., Николаева Н.В.47

Сельскохозяйственные науки (4.1.6. Лесоведение, лесоводство, лесные культуры, агролесомелиорация, озеленение, лесная пирология и таксация)

СТАТЬЯ

ПУЛЫ УГЛЕРОДА В ЭКОСИСТЕМАХ ПРИБАЙКАЛЬСКОГО ЗАКАЗНИКА
ПОСЛЕ ПОЖАРОВ

Милюхеев Е.Ю., Чимитдоржиева Г.Д.56

CONTENTS

Agricultural Sciences (4.1.1 General Agriculture and Plant Growing)

ARTICLE

EVALUATION OF THE PRODUCTIVITY OF VARIOUS PEAS SOWN
IN THE CONDITIONS OF THE LOWER VOLGA REGION

Kalinin V.Yu., Subbotin A.G.6

Geographical sciences (1.6.8, 1.6.12, 1.6.13, 1.6.21)

ARTICLE

TOURISM AND RECREATION DEVELOPMENT IN THE KHANTY-
MANSI AUTONOMOUS OKRUG-YUGRA: SPATIAL-PLANNING AND
TRANSPORT-GEOGRAPHICAL SOLUTIONS

Volkova I.N., Krylov P.M., Litvinenko T.V., Semina I. A.12

REVIEW

ECONOMIC AND GEOGRAPHICAL FEATURES OF THE FORMATION
OF THE GEOCULTURAL SPACE OF TAIMYR

Stryuchkova L.N.21

Geological and mineralogical sciences (1.6.3, 1.6.5, 1.6.6, 1.6.10, 1.6.12, 1.6.17, 1.6.21)

ARTICLES

PROFILE DISTRIBUTION OF MACROELEMENTS IN GRAY AND
DARK GRAY SOILS OF SOUTH OF THE TYUMEN REGION

Zemtsova E.S., Yakimov A.S., Tokareva A.Yu., Kolobov A.P., Alimova G.S.28

SILICEOUS THERMAL WATERS AS A PROMISING RECREATIONAL
RESOURCE IN THE KAMCHATKA TERRITORY

Rogatykh S.V., Gvozdenko T.A., Antonyuk M.V., Shtompel K.V.35

Technical sciences (1.6.7, 1.6.9, 1.6.16, 2.8.1, 2.8.6, 2.8.7, 2.8.9)

ARTICLE

THE RESEARCH ON THE EFFECTIVE SPECIFIC HEAT CAPACITY
OF COARSE-GRAINED SOIL DEPENDING ON MOISTURE CONTENT

*Tappyrova N.I., Kravtsova O.N., Malyshev A.V.,
Protodyakonova N.A., Timofeev A.M., Stepanov A.V.*40

REVIEW

MODELING OF HIGH GRADIENT MAGNETIC SEPARATION PROCESSES:
REVIEW OF THE METHOD AND ALGORITHM OF THE INTEGRATED APPROACH

Stepanov D.V., Aleksandrova T.N., Nikolaeva N.V.47

Agricultural sciences (4.1.6. Forestry, forestry, forest crops, agroforestry improvement, greening, forest pyrology and taxation)

ARTICLE

CARBON POOLS IN THE ECOSYSTEMS OF THE PRIBAIKALSKY
NATURE RESERVE AFTER FIRES

Milkheev E.Yu., Chimitdorzhiya G.D.56

СТАТЬЯ

УДК 633.31/.37

DOI 10.17513/use.38459

**ОЦЕНКА ПРОДУКТИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ СОРТОВ
ГОРОХА ПОСЕВНОГО В УСЛОВИЯХ НИЖНЕГО ПОВОЛЖЬЯ****Калинин В.Ю., Субботин А.Г.**

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии
имени Н.И. Вавилова», Саратов, Российская Федерация, e-mail: subbotinag2014@mail.ru*

В статье представлены результаты полевых исследований по особенностям роста и развития различных сортов посевного гороха в условиях Саратовского Правобережья. Экспериментальная часть проведена на опытном участке с южным черноземом в ИП Калинин Ю.В., расположенном в центральной Правобережной микроне, характеризующейся континентальным климатом. Средняя высота растений за 3 года исследований показала, что сорта Готик, Самариус и Аудит достоверно превышают стандартный сорт по этому параметру. Площадь листовой поверхности у всех изучаемых сортов демонстрировала плавное увеличение от фазы ветвления до фазы цветения – начала формирования бобов, после чего наблюдалось снижение данного показателя к моменту созревания. Максимальная площадь листьев у всех сортов была отмечена в фазе формирования бобов. На контрольном варианте (Агроинтел) посевы сформировали площадь листовой поверхности около 39,8 тыс. м²/га. Сорта Готик и Фараон показали преимущество по данному параметру, достигая 42,2–44,7 тыс. м²/га. В ходе исследований установлены различия в формировании продуктивности сухой и сырой надземной массы у изучаемых образцов гороха. Сорта Агроинтел, Готик и Самариус продемонстрировали наименьшие показатели продуктивности: 8,51–8,55 т/га сырой массы и 5,95–6,02 т/га сухой надземной биомассы. В свою очередь, сорта Аудит, Стабил и Фараон сформировали большую по величине надземную массу в условиях Саратовского Правобережья: 6,12–6,33 т/га сухого и 8,70–9,32 т/га сырого вещества. Среди изучаемых сортов наибольшая величина продуктивности зеленой и сухой биомассы была отмечена у сорта Фараон. Максимальная урожайность среди изученных сортов была получена на опытных делянках с сортом Самариус – 2,61 т/га. По содержанию протеина в зерне гороха достоверное преимущество было выявлено у сорта Готик.

Ключевые слова: горох, сорт, рост, развитие, урожайность

**EVALUATION OF THE PRODUCTIVITY OF VARIOUS PEAS SOWN
IN THE CONDITIONS OF THE LOWER VOLGA REGION****Kalinin V.Yu., Subbotin A.G.**

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
“Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov”,
Saratov, Russian Federation, e-mail: subbotinag2014@mail.ru*

The article presents the results of research on the growth and development of various varieties of field peas in the conditions of the Saratov Right Bank. The research was carried out on an experimental plot at the Kalinin Y.V. private enterprise located in the Lower Volga region with a continental climate on southern chernozem. The assessment of plant height parameters over an average of three years revealed varieties that significantly exceeded the standard: Gothic, Samarius, and Audit. The measurement of the leaf surface area revealed a smooth increase in the leaf surface area from the branching phase to the flowering-bean formation phase, followed by a decrease in this indicator by the time of maturity. During the bean formation phase, all the studied varieties had the largest leaf surface area. In the control variant (the Agrintel pea variety), the pea crops formed a leaf surface area of about 39.8 thousand m²/ha, but the Gothic and Pharaon varieties had an advantage in this regard, with an area of 42.2–44.7 thousand m²/ha. The differences in the formation of dry and wet above-ground mass in the studied pea varieties were established. The varieties Agrintel, Gotik, and Samarius had the lowest productivity rates of 8.51–8.55 t/ha of raw mass and 5.95–6.02 t/ha of dry above-ground biomass. In contrast, the varieties Audit, Stabil, and Pharaon accumulated a large above-ground mass in the conditions of the Saratov Right Bank, with 6.12–6.33 t/ha of dry matter and 8.70–9.32 t/ha of raw matter. Among the studied varieties, the Pharaon pea variety had the highest productivity of green and dry biomass. The Samarius pea variety had the highest yield of 2.61 t/ha. The Gothic variety has a significant advantage in terms of protein content in pea grains.

Keywords: peas, variety, growth, development, and yield

Введение

Анализ научных данных показывает, что в мировом сельском хозяйстве зернобобовые культуры играют значительную роль благодаря их широкому применению в различных отраслях человеческой деятельности (пищевой промышленности, животноводстве

и др.) [1–3]. Увеличение их доли в структуре посевных площадей способствует снижению химической нагрузки на почву, а также положительно влияет на поддержание и сохранение ее плодородия. Вследствие этого многие культуры этой группы широко используются в современных системах производства органической продукции.

Одной из древнейших культур, относящейся к семейству бобовых, является горох. Первые свидетельства его выращивания датируются раскопками возрастом 7–9 тыс. лет до н.э. В нашей стране горох стал известен с VI–VIII вв. В современных условиях культура пользуется стабильным спросом благодаря своей высокой пищевой ценности [4–6]. Последние достижения в пищевой промышленности позволяют использовать зерно этой ценной зернобобовой культуры более разнообразно и полноценно. Кроме того, включение гороха в севооборот способствует восстановлению плодородия почвы, что делает его ценным предшественником для большинства полевых культур [7–9].

Несмотря на неоспоримую ценность и преимущества гороха как культуры, посевные площади и урожайность зерна в нашей стране, включая Саратовскую область, остаются на недостаточно высоком уровне [10, 11]. Доля его в производстве растительного белка в настоящее время не превышает 3–5 %. Ввиду разнообразия сортов гороха возникает острая необходимость в их производственной оценке в конкретных почвенно-климатических условиях [12]. Исходя из этого, изучение продукционного процесса различных генотипов гороха на черноземах южных Правобережья Саратовской области имеет актуальное значение.

Цель исследования – изучить параметры роста, развития и продуктивность различных сортов гороха на южных черноземах Саратовского Правобережья.

Материалы и методы исследования

Полевые эксперименты проводили в 2021–2023 гг. (ГТК 2021 – 0,57, ГТК 2022 – 0,35, ГТК 2023 – 0,85) на опытном участке ИП Калинин Ю.В. Татищевского района, расположенном в Центральной Правобережной микроне Саратовской области. Почва представлена южным черноземом среднесуглинистым по гранулометрическому составу. Содержание гумуса – 5,6 %.

Объектом исследований являлись растения различных сортов гороха посевного: Агроинтел (стандарт), Готик, Стабил, Фараон, Самариус, Аудит.

Повторность опыта четырехкратная. Размещение вариантов рандомизированное. Площадь учетной делянки 50 м².

В ходе исследования параметров роста и развития созданных агроценозов гороха применялись общепринятые методики наблюдений, учета и анализа [13, 14]. Анализ структуры урожая и содержания проте-

ина проводили в лаборатории Вавиловского университета [15]. Статистическая обработка экспериментальных данных осуществлялась с использованием методов дисперсионного анализа посредством программы AGROS 2.09.

В качестве предшественника в опыте использовалась озимая пшеница. Агротехника возделывания гороха соответствовала рекомендованной зональной технологии.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты наблюдений и учета за период с 2021 по 2023 г. позволили выявить характерные особенности в формировании высоты растений изучаемых сортов гороха. В фазу ветвления фиксировали наибольшую высоту (17,8 см) на опытном участке с сортом гороха Агроинтел, принятым в качестве стандарта. Сорта Самариус и Готик незначительно отставали от него, достигая 17,5 и 18,1 см соответственно. Сорта Стабил, Фараон и Аудит характеризовались сравнительно меньшей высотой по сравнению со стандартом на 1,5–2,4 см. В фазе цветения были выявлены сорта гороха, превосходящие стандартный сорт по высоте – Готик, Фараон и Самариус (табл. 1). В период цветения – плодообразования наблюдалось интенсивное нарастание высоты растений всех изучаемых сортов. Сорт-стандарт Агроинтел достиг высоты 72,4 см. Превышение данного показателя было отмечено у сортов Готик, Фараон и Самариус.

Наименьшую высоту растений в этот период демонстрировал сорт Стабил (70,8 см). К моменту полного созревания наибольшая высота была зафиксирована у сорта Фараон (87,1 см), а наименьшая – у сорта Стабил (73,3 см).

Необходимо отметить, что в условиях Саратовского Правобережья интенсивный рост растений гороха в высоту отмечали преимущественно в первой половине вегетационного периода – от фазы всходов до начала образования бобов. Фотосинтетическая активность растений в агроценозах является основой продуктивности зернобобовых культур. Максимальные урожаи зерна, по научным данным, достигаются при совокупности следующих факторов фотосинтетической деятельности: оптимальных показателей площади ассимиляционной поверхности; максимальной продолжительности функционирования листьев всех ярусов; повышения интенсивности фотосинтеза; ускоренной

транспортировки ассимилятов из листьев в генеративные органы; оптимального соотношения между хозяйственно ценной частью и надземной частью растения. Исследование параметров развития ассимиляционной поверхности гороха с целью их оптимизации имеет существенное теоретическое и практическое значение.

Они позволили выявить определенную зависимость фотосинтеза посевов от генотипа изучаемых сортов. В период исследований отмечена следующая особенность: формирование наибольшей площади листовой поверхности достигается к периоду конца цветения – начала формирования бобов, а затем происходит постепенный спад ее к концу вегетации за счет отмирания и усыхания части листьев нижнего яруса (табл. 2).

Измерение площади листьев в различные фазы развития выявило следующие особенности. В фазу ветвления наибольшая величина ассимиляционной поверхности получена на делянках с сортом Фараон – 15,9 тыс. м²/га, наименьшая у сорта Ста-

бил – 13,5 тыс. м²/га. В период наступления полной фазы цветения площадь листьев у сорта-стандарта достигала величины 27,9 тыс. м²/га. Превышение на 2,6–4,0 тыс. м²/га выявлено у сортов гороха Самариус Готик и Фараон, а на вариантах с сортами Стабил и Аудит площадь ассимиляционной поверхности была ниже на 0,02–1,3 тыс. м²/га.

Наибольшая величина площади листьев у изучаемых сортов гороха сформировалась в фазу формирования бобов. Максимальная величина ассимиляционной поверхности отмечена у сортов гороха Готик и Фараон – 42,2–44,7 тыс. м²/га, а наименьшая – у сорта Стабил – 37,5 тыс. м²/га.

Значительное увеличение сырой надземной биомассы в посевах зернобобовых культур начинается с фазы ветвления растений и длится до фазы налива семян в бобах. Согласно результатам исследований, проведенных в период с 2021 по 2023 г., среднее накопление сухой и сырой биомассы в посевах гороха варьировалось в зависимости от фазы развития растения.

Таблица 1

Особенности формирования параметров высоты гороха (среднее за 2021–2023 гг.)

| Сорта | Высота растений по фазам вегетации, см | | | |
|-------------------|--|----------|--------------------|------------|
| | ветвление | цветение | формирование бобов | созревание |
| Агроинтел (ст.) | 17,8 | 39,6 | 72,4 | 74,6 |
| Готик | 18,1 | 41,3 | 76,1 | 78,6 |
| Стабил | 15,4 | 39,3 | 70,8 | 73,3 |
| Фараон | 16,3 | 44,1 | 83,4 | 87,1 |
| Самариус | 17,5 | 43,0 | 77,4 | 80,3 |
| Аудит | 15,9 | 39,1 | 71,1 | 73,9 |
| НСР ₀₅ | 0,81 | 2,01 | 3,47 | 3,65 |

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Таблица 2

Динамика формирования площади листьев гороха (среднее за 2021–2023 гг.)

| Сорта | Площадь листьев, тыс. м ² /га | | | | |
|-------------------|--|----------|--------------------|-------------|------------|
| | ветвление | цветение | формирование бобов | налив зерна | созревание |
| Агроинтел (ст.) | 14,0 | 27,9 | 39,8 | 35,3 | 6,1 |
| Готик | 14,2 | 31,7 | 43,2 | 38,6 | 8,1 |
| Стабил | 13,5 | 26,1 | 37,5 | 33,9 | 5,9 |
| Фараон | 15,9 | 31,9 | 44,7 | 39,8 | 8,7 |
| Самариус | 14,4 | 30,5 | 39,4 | 36,0 | 6,3 |
| Аудит | 13,8 | 27,7 | 37,1 | 34,0 | 5,6 |
| НСР ₀₅ | 0,69 | 1,41 | 1,96 | 1,61 | 0,30 |

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Таблица 3

Показатели урожайности сырой и сухой массы растений различных сортов гороха, т/га (среднее за 2021–2023 гг.)

| Сорта | Фазы вегетации | | | | | | | | | |
|-----------------|----------------|-------------|-------------|-------------|--------------------|-------------|-------------|-------------|-----------------|-------------|
| | ветвление | | цветение | | формирование бобов | | налив зерна | | полная спелость | |
| | сырая масса | сухая масса | сырая масса | сухая масса | сырая масса | сухая масса | сырая масса | сухая масса | сырая масса | сухая масса |
| Агроинтел (ст.) | 2,71 | 0,82 | 4,32 | 1,76 | 7,21 | 3,53 | 10,45 | 6,25 | 8,52 | 5,95 |
| Готик | 2,78 | 0,84 | 4,28 | 1,74 | 7,30 | 3,57 | 10,55 | 6,31 | 8,51 | 5,99 |
| Стабил | 2,94 | 0,89 | 4,57 | 1,86 | 7,86 | 3,85 | 11,21 | 6,71 | 9,00 | 6,33 |
| Фараон | 2,83 | 0,85 | 4,60 | 1,87 | 8,09 | 3,96 | 11,58 | 6,93 | 9,32 | 6,25 |
| Самариус | 2,74 | 0,83 | 4,27 | 1,74 | 7,14 | 3,50 | 10,48 | 6,27 | 8,55 | 6,02 |
| Аудит | 2,76 | 0,81 | 4,40 | 1,78 | 7,37 | 3,61 | 10,66 | 6,38 | 8,70 | 6,12 |

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

В фазе ветвления наблюдалось накопление 0,81–0,89 т/га сухой биомассы и 2,71–2,83 т/га сырой биомассы. В фазе цветения эти показатели составляли 1,74–1,87 т/га и 4,27–4,60 т/га соответственно. В фазу формирования бобов накопление сухой биомассы достигало 3,53–3,96 т/га, а сырой – 7,14–8,09 т/га. В фазе налива зерна эти значения увеличивались до 6,25–6,93 т/га и 10,45–11,58 т/га соответственно. В фазе полной спелости зерна накопление сухой биомассы составляло 6,02–6,33 т/га, а сырой – 8,51–9,32 т/га (табл. 3).

Выявлены различия в накоплении сухой и сырой надземной биомассы по изучаемым сортам гороха. Сорта Агроинтел, Готик и Самариус в изучаемой группе сортов имели меньшие показатели: 5,95–6,02 т/га сухой надземной биомассы и 8,51–8,55 т/га сырой биомассы к моменту уборки. Сорта Аудит, Стабил и Фараон, напротив, накапливали большую надземную массу: до 6,12–6,33 т/га сухого и до 8,70–9,32 т/га сырого вещества.

Полученные данные показывают, что это происходит за счет более высокой интенсивности нарастания вегетативной массы во второй половине вегетации, вследствие наиболее продуктивного использования влаги и питательных веществ в процессе формирования и налива зерновок растений гороха в посевах.

В ходе исследований выявлено, что сорт Фараон демонстрирует наиболее рациональное и равномерное развитие надземной биомассы. Он превосходит другие изученные сорта по показателям сухой (6,25 т/га) и сырой (9,32 т/га) массы к моменту уборки.

Оценка адаптивности изучаемых сортов полевых культур в конечном итоге основывается на структуре и уровне урожайности. Урожайность является отражением реакции генотипа сорта на изменения нерегулируемых факторов окружающей среды.

Нестабильность урожайности из года в год обусловлена высокой изменчивостью формирующих ее компонентов. Поэтому определение зависимости между элементами структуры урожая и абиотическими факторами (в данных почвенно-климатических условиях) является первостепенной практической задачей. Это позволит более полно оценить возможности реализации потенциальных свойств сорта.

Проведенный анализ экспериментальных данных по росту и развитию изучаемых сортов гороха выявил существенные различия между ними. Эти различия, несомненно, повлияли на способность сортов адаптироваться к стрессовым условиям, а также на эффективность использования влаги, почвенного плодородия и других экологических ресурсов в процессе формирования элементов урожайности. Анализ структуры урожая позволил выявить особенности реакции сортов на конкретные условия выращивания. Так, количество растений гороха к уборке у изучаемых сортов варьировало от 65 шт./м² (сорт Готик) до 74 шт./м² (сорт Стабил).

По результатам полевых исследований за период с 2021 по 2023 г., на опытных делянках с сортом Агроинтел отмечали следующие показатели элементов урожайности: количество зерен на 1 растении – 14,3 шт.; масса зерна с 1 растения – 2,73 г; масса 1000 зерен – 190 г.

Таблица 4

Элементы продуктивности и урожайность зерна у изучаемых сортов гороха
(среднее за 2021–2023 гг.)

| Сорта | Кол-во растений в уборку, шт./м ² | Кол-во зерен на одном растении, шт. | Масса 1000 зерен, г | Масса зерна с одного растения, г | Урожайность зерна, т/га | Содержание протеина, % |
|-------------------|--|-------------------------------------|---------------------|----------------------------------|-------------------------|------------------------|
| Агроинтел (ст.) | 71 | 14,3 | 190 | 2,73 | 1,94 | 22,9 |
| Готик | 65 | 12,2 | 234 | 2,86 | 1,86 | 24,7 |
| Стабил | 74 | 10,3 | 249 | 2,56 | 1,90 | 23,2 |
| Фараон | 70 | 14,7 | 231 | 3,40 | 2,38 | 22,0 |
| Самариус | 69 | 15,3 | 246 | 3,78 | 2,61 | 22,7 |
| Аудит | 73 | 14,6 | 228 | 3,34 | 2,44 | 21,6 |
| НСР ₀₅ | | 0,67 | 11,1 | 0,15 | 0,10 | 1,10 |

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Сорта Аудит, Фараон и Самариус по урожайности зерна с одного растения (в среднем за 2021–2023 гг.) выделялись на фоне других: 3,34–3,78 г. Количество семян с одного растения также было максимальным у этих сортов. Самую высокую массу 1000 зерен имели сорта Самариус (246 г) и Стабил (249 г) (табл. 4).

По результатам исследований наиболее адаптивными и урожайными сортами гороха в условиях Татищевского района оказались Фараон (2,38 т/га), Аудит (2,44 т/га) и Самариус (2,61 т/га).

Пищевые и кормовые достоинства зерна гороха обусловлены содержанием протеина. Проведенные исследования показали, что содержание протеина в зерне изучаемых генотипов подвержено значительным колебаниям по изучаемым сортам – от 21,6 до 24,7%. При этом по средним данным наибольшее содержание протеина накапливалось в зерне сорта Готик – 24,7%, а наименьшее – в зерне сорта Аудит – 21,6%.

Заключение

Оценка параметров роста и развития растений выявила различия у изучаемых сортов гороха. Так, среди изучаемых генотипов максимальной величиной высоты растений отличался сорт Фараон – 87,1 см. Сравнительная оценка площади ассимиляционной поверхности показала преимущество по данному показателю в фазу начала формирования бобов у сортов Готик (43,2 тыс. м²/га) и Фараон (44,7 тыс. м²/га). Наибольшая величина сырой массы выявлена на опытных делянках с сортом Фараон – 11,58 т/га, а по показателю сухой массы

максимальное значение отмечено на варианте с сортом Стабил – 6,33 т/га. В результате проведенных исследований наибольшая величина урожайности зерна сформирована у сорта гороха Самариус – 2,61 т/га. По содержанию протеина выявлено преимущество у сорта Готик – 24,7%.

Список литературы

1. Волобуева О.Г., Скоробогатова И.В., Шильникова В.К. Взаимодействие биологически активных веществ ризобий и ризобактерий с эндогенными фитогормонами растений гороха разных сортов // Агрохимия. 2008. № 8. С. 42–45. EDN: JHMXGR.
2. Турусов В.И., Гармашов В.М., Корнилов И.М., Нужная Н.А., Говоров В.Н., Крячкова М.П. Урожайность и структура урожая гороха при различных способах обработки почвы в условиях юго-востока ЦЧР // Зернобобовые и крупяные культуры. 2020. № 2 (34). С. 5–12. DOI: 10.24411/2309-348X-2020-11163. EDN: KXWRGR.
3. Ашиев А.Р., Хабибуллин К.Н. Изучение взаимосвязей урожайности с морфобиологическими признаками коллекционных образцов гороха посевного // Зерновое хозяйство России. 2020. № 3 (69). С. 3–7. DOI: 10.31367/2079-8725-2020-69-3-3-7. EDN: BXFPJG.
4. Кошеляев В.В., Кошеляева И.П., Шабышев Н.В. Оценка сортов гороха при различных уровнях минерального питания // Нива Поволжья. 2021. № 1 (58). С. 52–58. DOI: 10.36461/NP.2021.58.1.003. EDN: JAXWUV.
5. Субботин А.Г., Нарушев В.Б., Солодовников А.П., Летучий А.В. Продуктивность смешанных посевов однолетних полевых культур в сухостепной зоне Поволжья // Кормопроизводство. 2018. № 3. С. 6–10. EDN: YURJDX.
6. Петрижиковский Д.Э., Лупашина Е.П., Петрушкова Д.А., Козаренко А.Ю., Терехин Н.В. Продуктивность растений гороха в зависимости от применения биологических препаратов // АгроФорум. 2022. № 5. С. 68–69. EDN: WETWNC.
7. Мищенко А.Е., Мищенко А.В. Технология возделывания гороха в условиях эрозионно-опасных склонов Ростовской области // Фермер. Поволжье. 2017. № 3 (56). С. 62–67. EDN: ZCPDWR.
8. Зеленев А.А. Новый морфотип гороха и оценка перспективы его использования в чистых и смешанных посевах // Агробизнес и экология. 2015. Т. 2. № 2. С. 229–232. EDN: VZKVVV.

9. Кожухова Е.В., Плеханова Л.В. Продуктивность и питательная ценность образцов гороха разных морфотипов // Вестник ИрГСХА. 2021. № 106. С. 42–53. DOI: 10.51215/1999-3765-2021-106-42-53. EDN: MZXPCS.
10. Беляев В.И., Черепанова О.В., Прокопчук Р.Е. Оценка эффективности минерального питания на сортах гороха посевного в условиях лесостепи Алтайского края // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2023. № 1 (219). С. 43–50. DOI: 10.53083/1996-4277-2023-219-1-43-50.
11. Вошедский Н.Н., Кулыгин В.А. Влияние элементов технологии возделывания на урожайность новых сортов гороха в условиях Нижнего Дона // Земледелие. 2024. № 7. С. 19–24. DOI: 10.24412/0044-3913-2024-7-19-24. EDN: GBIOJX.
12. Кирсанова Е.В., Цуканова З.Р., Мельник А.Ф., Смит И.Н. Оценка эффективности применения физиологически активных веществ в семеноводстве гороха // Вестник аграрной науки. 2023. № 2 (101). С. 19–28. DOI: 10.17238/issn2587-666X.2023.2.19. EDN: BLEGYA.
13. Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. М.: Колос, 1985. Вып. 1. 267 с.
14. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований), 5-е изд., доп. и перераб. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.
15. ГОСТ 10846-91. Зерно и продукты его переработки. Метод определения белка. М.: Издательство стандартов, 1992. 10 с.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

СТАТЬИ

УДК 911.3(571.122)

DOI 10.17513/use.38460

**РАЗВИТИЕ ТУРИЗМА И РЕКРЕАЦИИ
В ХАНТЫ-МАНСИЙСКОМ АВТОНОМНОМ ОКРУГЕ – ЮГРЕ:
ПРОСТРАНСТВЕННО-ПЛАНИРОВОЧНЫЕ
И ТРАНСПОРТНО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ**

¹Волкова И.Н. ORCID ID 0000-0002-5982-8983,²Крылов П.М. ORCID ID 0000-0002-9212-8751,¹Литвиненко Т.В. ORCID ID 0000-0003-1027-1018,³Семина И.А. ORCID ID 0000-0002-7468-3102¹Институт географии Российской академии наук, Москва, Российская Федерация;²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Государственный университет просвещения», Москва, Российская Федерация;³Национальный исследовательский Мордовский государственный университет, Саранск,
Российская Федерация, e-mail: isemina@mail.ru

Целью исследования является рассмотрение и краткий анализ ряда типичных и особенных проблем развития туристско-рекреационной деятельности в северных и слабо освоенных регионах России на примере Ханты-Мансийского автономного округа – Югры. Задачей исследования является изучение перспектив туризма и рекреации региона с позиции пространственно-планировочных и транспортно-географических решений. В основе настоящей работы лежат материалы территориального планирования (схемы территориального планирования Ханты-Мансийского автономного округа), в создании которых принимал участие один из авторов настоящей статьи. Применялись геосистемный, структурно-отраслевой и проблемный подходы к исследованию. Авторами был проведен обзор публикаций по изучаемой проблематике, как в общем виде для слабо освоенных регионов страны, так и в особенности для Ханты-Мансийского автономного округа. В работе рассматриваются потенциальные градостроительные и транспортные решения, которые могут стать основой для успешного развития туризма и рекреации в округе. В ходе исследования выявлены ключевые направления туризма, способные повысить привлекательность региона как туристического центра. Установлено, что наиболее перспективными для региона являются водный (речной), рыболовный и автомобильный виды туризма. Ключевые линейные элементы опорного туристско-рекреационного каркаса предлагается развивать в рамках существующих коридоров социально-экономического развития округа: «Сибирского коридора» и «Северного маршрута».

Ключевые слова: Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, туризм и рекреация, опорный каркас, туристическая дестинация, малоосвоенные регионы, транспортная освоенность территории

**TOURISM AND RECREATION DEVELOPMENT IN
IN THE KHANTY-MANSI AUTONOMOUS OKRUG-YUGRA:
SPATIAL-PLANNING AND TRANSPORT-GEOGRAPHICAL SOLUTIONS**

¹Volkova I.N. ORCID ID 0000-0002-5982-8983,²Krylov P.M. ORCID ID 0000-0002-9212-8751,¹Litvinenko T.V. ORCID ID 0000-0003-1027-1018,³Semina I.A. ORCID ID 0000-0002-7468-3102¹Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation;²Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education
“State University of Enlightenment”, Moscow, Russian Federation;³National Research Mordovian State University, Saransk, Russian Federation,
e-mail: isemina@mail.ru

This study aims to examine and analyze key challenges in the development of tourism and recreational activities in northern and underdeveloped Russian regions, focusing on the Khanty-Mansi Autonomous Okrug. The objective of this study is to investigate the potential for tourism and recreational activities in the region, focusing on spatial planning and transportation geography. This research is based on the materials of territorial planning, specifically the development schemes for the Khanty-Mansi Autonomous Okrug, in which one of the authors participated. The research employs geosystems, structural-sectoral, and problem-oriented approaches. The authors conducted a comprehensive review of scholarly literature pertaining to the subject matter, encompassing both general overviews of underdeveloped regions within the country and specific analyses of the Khanty-Mansi Autonomous Okrug. This paper analyzes potential urban planning and transportation infrastructure strategies aimed at fostering the successful development of tourism and recreational activities within the Khanty-Mansi Autonomous Okrug. The research has identified the sectors within the tourism industry that have the potential to enhance the region's appeal as a tourist destination. It has been determined that the most promising tourism activities for the region include water-based tourism, specifically river-related activities, fishing, and automobile-oriented tourism. It is proposed to construct the principal linear components of the tourist and recreational infrastructure within the existing socio-economic development corridors of the region, specifically the «Siberian Corridor» and the «Northern Route».

Keywords: Khanty-Mansi Autonomous Okrug-Yugra, tourism and recreation, supporting framework of the territory, tourist destination, underdeveloped regions, territorial transport development

Введение

Туризм и рекреация за последнее время стали одним из важнейших направлений развития этой деятельности как подотрасли сферы услуг во всем мире, в том числе и в России. Во многих регионах и странах эта деятельность составляет значительную долю ВВП, и число занятого в ней населения растет. Развитие туристско-рекреационной деятельности все чаще рассматривается как важное направление повышения уровня диверсификации экономики северных ресурсодобывающих регионов [1].

Рост уровня жизни и рост урбанизации населения, развитие все новых и более скоростных видов транспорта, «стирание» границ между странами и континентами – всё это привело к увеличению количества населения всех возрастов, желающих и имеющих возможность активно отдыхать вне своего места проживания. Видов и направлений как туризма, так и рекреации становится все больше, и связано это не в последнюю очередь с одной их важной особенностью: чем они разнообразнее, в том числе – географически, тем привлекательнее для потребителя. И это разнообразие должно постоянно расти и совершенствоваться, являясь важнейшим фактором конкуренции на рынке такого рода услуг.

Именно географическое разнообразие привлекает активных рекреантов в такие далеко не самые климатически комфортные и инфраструктурно обустроенные регионы, как Ханты-Мансийский автономный округ – Югра (ХМАО). Поэтому можно с определенной долей оптимизма рассматривать перспективы развития туризма и рекреации в отдаленных и слабо освоенных частях страны, не опасаясь, что они будут мало востребованы. По мере развития в них минимального стандарта обслуживания рекреантов можно в перспективе рассчитывать на все более растущие потоки активных отдыхающих. Однако для привлечения потенциальных туристов в северных и слабо освоенных регионах необходимо приложить больше усилий, средств и креатива для решения значительного количества проблем в данной сфере услуг, включая решение проблемы транспортной доступности удаленных районов.

Целью исследования является рассмотрение и краткий анализ ряда типичных и особенных проблем развития туристско-рекреационной деятельности в северных и слабо освоенных регионах России на примере ХМАО. Задачей исследования

является изучение перспектив туризма и рекреации региона с позиции пространственно-планировочных и транспортно-географических решений.

Материалы и методы исследования

В основе настоящей работы лежат материалы территориального планирования (схемы территориального планирования ХМАО), в создании которых принимал участие один из авторов настоящей статьи. Применялись геосистемный, структурно-отраслевой и проблемный подходы к исследованию. Авторами был проведен библиографический анализ по изучаемой проблематике, как в общем виде для слабо освоенных регионов страны, так и в особенности для ХМАО.

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ имеющихся публикаций по современной ситуации и основным проблемам в сфере туризма и рекреации в северных и слабо освоенных регионах, в том числе ХМАО, позволил выделить следующие виды проблем, как общие для всех регионов, так и специфические, связанные с особенностями ХМАО. 1. Институциональные [2] и законодательные проблемы развития туристско-рекреационной деятельности на уровне региона [3; 4]. 2. Развитие туризма (и транспортного фактора в этом аспекте) в направлении повышения социально-экономических позиций северного региона страны [5; 6]. 3. Туристско-рекреационная инфраструктура и решение проблем ее создания и совершенствования [7; 8]. 4. Изучение и введение в поле актуального использования историко-культурного наследия как потенциала развития туристско-рекреационной сферы ХМАО [9; 10]. 5. Проблемы этнического туризма как фактора экономического развития региона и сохранения культурной идентичности проживающих там коренных малочисленных народов [11]. 6. Современные и возможные в будущем экологические последствия туристско-рекреационного освоения территории ХМАО и вопросы охраны его природных ландшафтов и ООПТ [12; 13]. 7. Пространственные особенности и приоритеты развития туристско-рекреационного потенциала северных территорий страны [14; 15]. 8. Территориальные сдвиги в развитии туризма [16; 17]. 8. Теоретические [18] и прикладные вопросы формирования рекреационно-туристических пространств

русской Арктики [19; 20]. 9. Поиск и развитие особенных, специфических или специальных видов туризма и рекреации как факторов привлечения в регион потребителей оригинальных и разнообразных видов услуг. Создание конкурентоспособных региональных турпродуктов для продвижения их на общероссийский и мировой рынок [21; 22].

Пространственное развитие территории является одним из важнейших приоритетов региональной политики ХМАО и основывается на возможности наиболее полного использования природных, людских и материальных ресурсов, которыми располагает ее территория. Выявлено неравномерное распределение ресурсов в регионе – наблюдается концентрация их по узлам и линиям межузловых связей, которые вместе образуют планировочную структуру территории, отличающуюся относительной стабильностью.

В настоящее время западносибирские города выглядят привлекательно, благоустроенно, условия жизни и комфортности относительно высоки, но их инфраструктура не сильно ориентирована на въездной туризм: инфраструктура не имеет характера уникальности, необычности, не отражает специфики природного и культурно-исторического контекста территории. Только г. Ханты-Мансийск, обладая некоей «столичностью», предлагает высокий уровень и качество туристского продукта, включая инфраструктуру и для въездного туризма. Специфика турпродукта в Ханты-Мансийском автономном округе – Югре видится и в отсутствии его интегрированности, он ориентирован в основном на локальный спрос, города существуют автономно. Туристской инфраструктуры за пределами городов, загородных объектов, еще явно недостаточно. Предложение большей частью сконцентрировано вокруг крупных городов, в комфортной автомобильной доступности (1–1,5 часа). Около половины предложений (39%) расположено в Сургутском и Нижневартовском районах.

Планируемые к размещению объекты регионального значения могут оказывать положительное или негативное влияние на комплексное развитие территории. В зависимости от вида объекта это влияние может касаться всей территории региона или ее части. Экономическая (инвестиционная) эффективность планируемых к размещению объектов регионального значения на территории Ханты-Мансийского автономного округа – Югры обоснована применением

в схеме территориального планирования действующих схем размещения отраслей (видов деятельности), ряда инвестиционных программ.

Ключевая задача – объединить возможности существующих туристических точек притяжения региона и создать вокруг них инфраструктуру, которая позволит сделать отдых в Ханты-Мансийском автономном округе – Югре комфортным, экологичным и контролируемым. Для этого на прилегающих территориях необходимы места для отдыха, площадки для кемпингов и глэмпингов, оборудованная придорожная инфраструктура, выстроенное внутрирегиональное сообщение и т.д. Это связано с тем, что туризм всегда базируется на его основном потребителе – человеке, поэтому в первую очередь важно развивать те направления и аттракции, которые уже сейчас пользуются спросом. Второй по значимости фактор, определяющий жизнеспособность объектов притяжения и развития тяготеющей к ним инфраструктуры, – транспортная доступность, обеспечивающая устойчивый поток посетителей.

В материалах *Схемы территориального планирования Ханты-Мансийского автономного округа – Югры* местоположение площадок для создания уникальных придорожных комплексов, позволяющих монетизировать транзитный автомобильный трафик, планируется в следующих населенных пунктах: г. Нижневартовск, г. Радужный, г. Лангепас, г. Покачи, д. Русскинская, г. Сургут, п. Салым, п. Горноправдинск, г. Нягань, г. Югорск. Создание торгово-сервисных общественных пространств и загородных парк-отелей в агломерациях для увеличения оборота организаций сферы туристических услуг на 5 млрд рублей в год к 2026 году предполагается в гг. Сургуте, Ханты-Мансийске, Нижневартовске. Мероприятия по развитию сервисной экономики планируется развивать в Сургутском районе (достопримечательное место – «Барсова гора»). Развитие этнотуризма возможно за счет создания системы гостевых этностойбищ и благоустройства национальных поселков с целью сокращения чистого годового экспорта туристических услуг региона на 100 млн рублей к 2026 году. Территориальное размещение объектов этнотуризма возможно в городах Сургуте, Ханты-Мансийске, Нижневартовске, Нефтеюганске, в Сургутском, Ханты-Мансийском и Нижневартовском районах. Коллективные средства размещения и иные объекты обеспечи-

вающей инфраструктуры туристско-рекреационной деятельности (здания, сооружения) должны быть доступны для инвалидов и других маломобильных групп населения и отвечать требованиям действующих нормативных документов, регламентирующих доступность зданий и сооружений для маломобильных групп населения.

Транспортная инфраструктура и транспортная доступность территории

Отличительная черта территориальной организации региона ХМАО – это комбинация территорий с низкой плотностью

населения и территорий с высокой плотностью, практически сложившейся в городские агломерации. Транспортная система региона находится в стадии формирования, выделяются ключевые и дополнительные узлы опорного каркаса (таблица). При наличии сформированного транспортного каркаса имеются определённые проблемы с транспортной доступностью удалённых населённых пунктов [23]. В зимний период движение автомобильного транспорта на значительной территории Югры возможно по временным, зимним автомобильным дорогам (зимникам) и ледовым переправам.

Ключевые и дополнительные узлы опорного каркаса и их характеристики

| Населенные пункты ХМАО-Югры | Основные узлы каркаса | Дополнительные узлы каркаса | Создание торгово-сервисных общественных пространств и загородных парков-отелей | Площадки для создания уникальных придорожных комплексов | Территориальное размещение объектов этнотуризма | Основные точки входа в регион для въездного потока туристов | Основные остановки круизных и пассажирских теплоходов в ХМАО |
|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------|--|---|---|---|--|
| г. Белоярский | + | | | | | | |
| п. Березово | + | | | | | | + |
| п. Горноправдинск | | | | + | | | |
| г. Когалым | + | | | | | + | |
| п. Игрим | + | | | | | | |
| г. Лангепас | | + | | + | | | |
| п. Междуреченский | | + | | | | | |
| г. Нефтеюганск | + | | | | + | | |
| г. Нижневартовск | | | + | + | + | + | |
| Нижневартовский район | | | | | | | |
| д. Нижние Нарыкалы | | + | | | | | |
| г. Нягань | + | | | + | | | |
| г. Покачи | | + | | + | | | |
| п. Приобье | + | | | | | | |
| г. Пыть-Ях | | + | | | | | |
| д. Русскинская | | | | + | | | |
| г. Радужный | | + | | + | | | |
| п. Салым | | | | + | | | |
| с. Саранпауль | + | | | | | | |
| п. Сергино | | | | | | | + |
| п. Сосьва | | + | | | | | |
| г. Сургут | + | | + | + | + | + | + |
| Сургутский район | | | | | | | |
| г. Урай | + | | | | | | |
| г. Ханты-Мансийск | + | | + | | + | + | + |
| Ханты-Мансийский район | | | | | | | |
| г. Югорск | | + | | + | | | |

Источник: составлено авторами.

Для автотуристов, осуществляющих самостоятельное путешествие по дорогам автономного округа на автомобилях, большое значение имеет наличие качественной придорожной инфраструктуры. На сегодняшний день количество и качество предприятий придорожного сервиса в Югре активно развивается, но еще не достигло достаточного уровня. Наиболее востребованными объектами придорожного сервиса на 2024 год являются: кемпинг (19,5%), кафе или закусочная (18,3%), мотель (17,1%). В структуре рынка придорожного сервиса Югры доля АЗС составляет 22,2%, доля объектов общественного питания – 35%, магазинов – 19,0%, автостоянок – 8,8%, гостиниц – 8,4%, СТО – 6,6%.

Автономный округ находится на значительном расстоянии от большинства центральных и южных регионов России с высокой плотностью населения, являющихся потенциальными потребителями туристского продукта Югры. Однако большие расстояния компенсируются хорошей транспортной авиадоступностью. На территории автономного округа работают больше десяти аэропортов, три из них имеют статус международных. Столица региона связана авиасообщением с крупными уральскими центрами, а рейсы в Москву совершаются ежедневно. Основными точками входа в регион для въездного потока туристов являются города: Ханты-Мансийск, Сургут, Нижневартовск, Когалым. В Югре хорошо развита региональная сеть авиамаршрутов, путешественник может добраться практически в любую часть автономного округа – из Ханты-Мансийска можно улететь в Белоярский, Берёзово, Когалым, Нижневартовск, Нягань, Советский и Сургут. Все крупные города округа связывают прямые рейсы, что позволяет при необходимости построить собственный маршрут по региону. Кроме того, круглогодично, для доставки пассажиров и грузов в трудно- и малодоступные места, осуществляются местные вертолетные авиаперевозки, для чего на территории округа задействовано более 180 вертолетных площадок. Железнодорожный транспорт представлен на территории округа несвязанными участками железных дорог, проходящими с юга на север. Широкие железнодорожные связи развиты недостаточно. В одной из главных точек притяжения туристов, находящейся почти в центральной части автономного округа – г. Ханты-Мансийск, железнодорожной связи нет. Сдерживающим фактором для возмож-

ных путешествий по железной дороге с целью «увидеть сразу всю территорию» Югры является недостаточный уровень связности территории с позиций железнодорожного транспорта – она состоит из не связанных между собой участков. Рисунок 1 показывает новые планируемые к строительству железнодорожные линии на территории округа в ближайшие десятилетия.

Водный вид транспорта на территории автономного округа представлен речным транспортом. Массовому использованию водного транспорта, в том числе и в целях туризма, способствует плотная речная сеть. Главными судоходными водными артериями автономного округа являются Обь и Иртыш с многочисленными притоками. Пассажирские перевозки производятся в основном судами компаний АО «Об-Иртышское речное пароходство» и АО «Северречфлот». К услугам туристов могут быть предоставлены круизные речные суда (теплоходы), а также небольшие плавательные средства – катера, паромы, аэролодки (судна на воздушной подушке), применяемые для перевозок пассажиров в отдаленные малодоступные районы. В советское время на территории Ханты-Мансийского автономного округа – Югры был развит речной круизный туризм. Существовали межрегиональные многодневные маршруты по рекам Сибири, берущие свое начало из Омска, Тюмени, Новосибирска и Томска. В 1990-е годы этот вид туризма в автономном округе деградировал, но в настоящее время наблюдаются попытки его возрождения. Сегодня особой популярностью у туристов пользуются речные круизы на теплоходах к месту слияния двух великих сибирских рек Обь и Иртыш. Организуются речные экскурсионные прогулки с культурно-развлекательной программой по реке Обь и межрегиональные речные маршруты.

Проектную пространственно-территориальную (планировочную) организацию туристско-рекреационной системы автономного округа предлагается рассматривать на базе опорного туристско-рекреационного каркаса, обеспечивающего связность и целостность туристского пространства и представляющего собой иерархичную систему, в основе которой рассматриваются узловые, линейные и площадные элементы. Опорный туристско-рекреационный каркас автономного округа формируется вдоль рек Обь и Иртыш и их крупных притоков, вдоль автомобильных и железных дорог федерального и регионального значения, проходящих в двух транспортных коридорах – широтном и меридиональном.



Рис. 1. Новые планируемые железнодорожные линии Полуночное – Обская и Салым – Ханты-Мансийск (выделены красным цветом)
 Источник: URL: <https://dzen.ru/a/Y5HnWoGkhim4YTF?ysclid=m3ур7xg57a238441773>

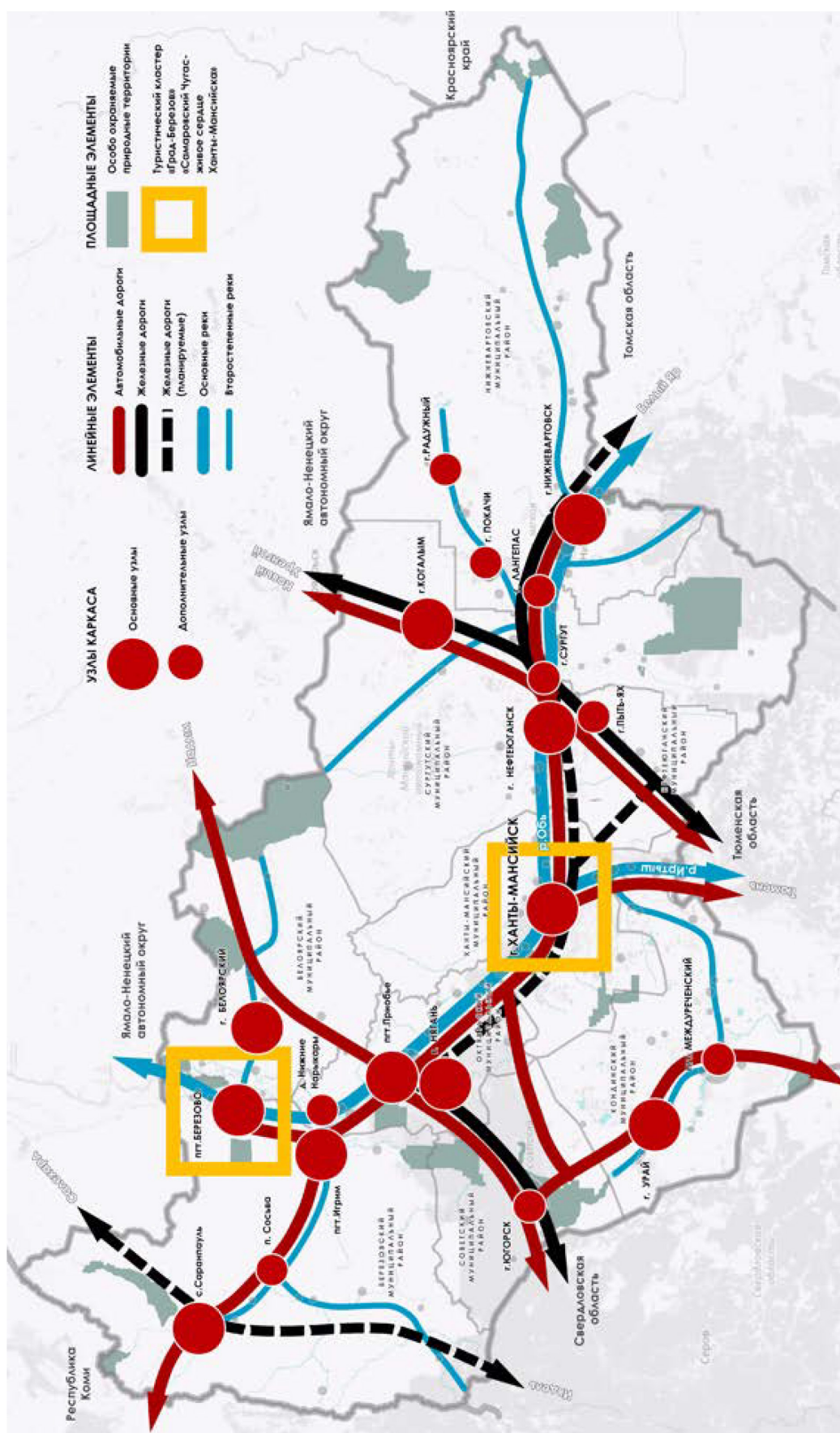


Рис. 2. Туристско-рекреационный опорный каркас Ханты-Мансийского автономного округа – Югры
Источник: авторы, АО «Гипрогор»»

Учитывая специфику туризма в регионе, связанную с ярко выраженной сезонностью туристических (не деловых) поездок, а также с ограниченной транспортной доступностью из-за недостаточного количества круглогодичных дорог, проектный опорный туристско-рекреационный каркас (рис. 2) предлагается развивать преимущественно за счет речных летних маршрутов и вокруг основных опорных узлов. Узловые точки каркаса представлены развитыми туристскими дестинациями (туристские центры, центры целенаправленного развития местных обычаев и культуры, национальные парки, горнолыжные курорты и пр.) с относительно устойчивым и регулярным туристским потоком, функционально и транспортно-коммуникационно связанными между собой. Проектом рассматриваются населенные пункты, являющиеся объектами туристского тяготения. К основным узлам каркаса предлагается отнести городские населенные пункты: Ханты-Мансийск, Нефтеюганск, Нижневартовск, Сургут, Игрим, Саранпауль, Приобье, Березово, Когалым, Белоярский, Урай, Нягань. В качестве дополнительных узлов каркаса рассматриваются: Югорск, Нижние Нарыкалы, Сосьва, Междуреченский, Радужный, Покачи, Лангепас, Пыть-Ях.

Главные линейные элементы опорного туристско-рекреационного каркаса предлагается развивать в створе основных действующих коридоров социально-экономического развития автономного округа – двух федеральных транспортных коридоров, являющихся важными звеньями направлений Арктика – Азия и Северный широтный коридор: «Сибирский коридор» (Тюмень – Тобольск – Сургут – Новый Уренгой – Надым – Салехард); «Северный маршрут» (Пермь – Ивдель – Ханты-Мансийск – Нефтеюганск – Сургут – Нижневартовск – Томск); реки Обь и Иртыш. Второстепенные линейные элементы каркаса предлагаются вдоль крупных притоков Оби и Иртыша, автомобильных дорог: Ивдель – Югорск – Нягань – Приобье – Сосновка – Надым; Сургут – Лянтор; Югорск – пгт Таежный; Сургут – Нижневартовск; Урай – Советский. Перспективное линейное развитие туристско-рекреационного каркаса рассматривается в том числе за счет транспортной связи г. Ханты-Мансийска – главного узла опорного туристско-рекреационного каркаса региона, с районами Приполярного Урала – Березовским и Белорецким, имеющими высокий потенциал развития туризма.

В качестве площадных элементов каркаса рассматриваются особо охраняемые природные территории (ООПТ), водно-болотные угодья, туристско-рекреационные кластеры. Развитие площадных элементов каркаса на тер-

ритории автономного округа предлагается за счет дальнейшего формирования системы ООПТ – образования новых заказников, заповедников, выявления новых памятников природы, а также развития туристско-рекреационных кластеров: «Град Березов», «Самаровский чугас – живое сердце Ханты-Мансийска» и, на перспективу (за пределами расчетного срока), – кластер «Юганский».

Заключение

Конкурентоспособность субъекта Российской Федерации сегодня определяется наличием эффективных отраслей или сегментов отрасли, что значительно проявляется и в сфере туризма. К приоритетным или стратегическим видам туризма, способным повысить привлекательность региона как туристической дестинации, относятся те виды туризма, которые будут давать весомый материальный и нематериальный эффект для отрасли, усиливать региональную уникальность, более полно использовать ресурсный потенциал и существующий турпоток, приносить дополнительный доход. К таким видам в ХМАО можно отнести в первую очередь водный туризм по речной системе, рыболовный и автомобильный туризм. Речная система Ханты-Мансийского автономного округа – Югры является его уникальным туристским ресурсом, пассажиропоток по водному транспорту вдвое выше авиационного. Рыболовный туризм имеет возможность превратить округ в третью рыболовную провинцию России, наряду с Астраханской и Мурманской областями. Автомобильный транспорт является основным в округе, имеют место значительные транзитные людские потоки из соседних регионов. Для указанных видов туризма нет необходимости создавать дорогостоящие объекты инфраструктуры. Эти виды, кроме того, создают взаимную синергию. В перспективе пространственно-территориальную организацию туристско-рекреационной системы ХМАО предлагается развивать на базе опорного туристско-рекреационного каркаса, обеспечивающего связность и целостность туристского пространства округа и представляющего собой иерархическую систему, в основе которой рассматриваются узловые, линейные и площадные элементы.

Список литературы

1. Шевченко Р.А. Развитие туризма как направление повышения уровня диверсификации экономики северных ресурсодобывающих регионов // Бизнес-трансформация: управление улучшениями. 2025. № 2 (11). С. 37–45. URL: <https://snojurnal-ugrasu.ru/release/> (дата обращения: 12.11.2025).

2. Албахри Ж.С. Экспертиза возможностей туризма и отдыха в Арктической зоне Европейской России // *Reports Scientific Society*. 2024. № 2 (46). С. 9-13. URL: [https://moofrnk.com/assets/files/journals/reports-scientific-society/46/Reports%20\(46\)2024-main.pdf](https://moofrnk.com/assets/files/journals/reports-scientific-society/46/Reports%20(46)2024-main.pdf) (дата обращения: 12.11.2025).
3. Балабейкина О.А. Упраздненные поселения в системе функционирования туристско-рекреационного хозяйства // *Технико-технологические проблемы сервиса*. 2023. № 1 (63). С. 98–104. URL: <https://unecon.ru/nauka/izdaniya/zhurnal-tehniko-tehnologicheskie-problemy-servisa/e-version/> (дата обращения: 12.11.2025).
4. Мельситова Е.Ш., Утяшева А.А. Развитие стратегических направлений в арктической зоне РФ: туристический сектор (на примере ХМАО-Югры) // *Актуальные вопросы современной экономики*. 2025. № 3. С. 217-222. URL: https://ayse-journal.ru/file/file_863206983023.pdf (дата обращения: 18.11.2025). EDN: NRRQJQJ.
5. Есипова С.А., Хромцова Л.С. Оценка влияния основных показателей туристской отрасли северного региона на его социально-экономическое развитие // *Креативная экономика*. 2022. Т. 16. № 6. С. 2347-2362. URL: <https://1economic.ru/lib/114828> (дата обращения: 18.11.2025). EDN: LDWMKU.
6. Дмитриева Е.В., Маслова А.П. Реки Арктической зоны как вектор развития Северного морского пути. Проблемы и потенциал эксплуатации внутренних водных путей регионов Сибири и Дальнего Востока России // *Транспортное дело России*. 2023. № 4. С. 57-59. DOI: 10.52375/20728689_2023_4_57. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54637883> (дата обращения: 01.11.2025). EDN: PKYXAK.
7. Гавва Р.В., Ложкомоева Е.Н. Раскрытие туристско-рекреационного потенциала // *Научный вестник МИГФКСИТ*. 2020. № 3 (65). С. 54–61. URL: <https://mgusit.mossport.ru/science/30600/>. (дата обращения: 11.11.2025).
8. Крымская О.Л., Есипова С.А. Коллективные средства размещения как драйвер увеличения регионального туристского потока на примере Ханты-Мансийского автономного округа – Югры // *Региональная экономика и управление*. 2025. № 1 (81). URL: <https://eee-region.ru/article/8107/> (дата обращения: 12.11.2025).
9. Севастьянов Д.В. Геокультурное пространство Русского Севера и современный туризм // *Россия: общество, политика, история*. 2022. № 4 (4). С. 142-161 URL: <https://www.ru-society.com/jour/article/view/52> (дата обращения: 18.11.2025). EDN: DPVHLN.
10. Колодий Н.А. Культура как ресурс экономики ощущений // *Вестник Томского государственного университета. Философия. Социология. Политология*. 2011. № 4 (16). С. 94–102. URL: https://journals.tsu.ru/philosophy/&journal_page=archive&id=521&article_id=25423 (дата обращения: 10.11.2025).
11. Брель О.А., Чайкина Е.В., Кайзер Ф.Ю., Жорова О.И. Анализ туристских территорий регионов Южной Сибири в контексте развития этнографического туризма // *Географический вестник*. 2022. № 4 (63). С. 98–114. DOI: 10.17072/2079-7877-2022-4-98-114. URL: <https://press.psu.ru/index.php/geogr/article/view/6070> (дата обращения: 12.11.2025).
12. Котова Е.С., Сергеева М.С., Яковлева С.И. Расселение и туризм заповедных территорий // *Вестник Тверского государственного университета. Серия: География и геоэкология*. 2020. № 1 (29). С. 136–142. DOI: 10.26456/2226-7719-1-2020-136-142. URL: <https://eprints.tversu.ru/id/eprint/9692/> (дата обращения: 12.11.2025).
13. Гаджиева Е.А., Севастьянов Д.В. Новые горизонты развития рекреационного природопользования и туризма в арктической зоне Российской Федерации // *География и экология в школе XXI века*. 2022. № 7. С. 25-29. URL: <https://elibrary.ru/snijmn> (дата обращения: 18.11.2025). EDN: SNIJMN.
14. Есипова С.А., Хромцова Л.С. Стратегическое развитие туристско-рекреационного потенциала ресурсодобывающего северного региона. Курск: Университетская книга, 2023. 181 с. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=53327705> (дата обращения: 18.11.2025). ISBN: 978-5-907710-88-7.
15. Мошков А.В. Пространственные особенности формирования Дальневосточной туристско-рекреационной зоны России // *Этносоциум и межнациональная культура*. 2021. № 2 (152). С. 50-65. URL: <https://ethnosocium.ru/sites/default/files/2-152.pdf> (дата обращения: 18.11.2025). EDN: DHEQXO.
16. Литвиненко Т.В., Крылов П.М. Туризм на Дальнем Востоке России: динамика, территориальные сдвиги и внутренние различия // *Успехи современного естествознания*. 2023. № 10. С. 44–48. DOI: 10.17513/use.38112. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54762143> (дата обращения: 10.11.2025).
17. Кружалин В.И., Оздоева Л.Х. Восприятие арктического туризма в регионах России для дальнейшего развития туристско-рекреационной деятельности // *Региональные исследования*. 2025. № 1 (87). С. 108-119. URL: <https://scinetwork.ru/articles/33150> (дата обращения: 18.11.2025). EDN: KBSGVJ.
18. Худякова Т.М., Крутских О.А., Рязанцев А.С. Теоретические и методические вопросы рекреационного районирования регионов России // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология*. 2021. № 2. С. 55-60. URL: <https://journals.vsu.ru/geo/article/view/3448> (дата обращения: 18.11.2025). EDN: HTDLKF.
19. Савельев М.В., Жоров Ю.В., Жуковская Д.С., Давыдова А.А. Особенности формирования рекреационно-туристических пространств в Сибирском регионе // *Вестник Томского государственного университета. Культурология и искусствоведение*. 2023. № 51. С. 97–114. DOI: 10.17223/22220836/51/9. URL: https://journals.tsu.ru/culture/&journal_page=archive&id=2393 (дата обращения: 06.11.2025).
20. Кондратьева С.В., Каргинова-Губинова В.В., Морошкина М.В. Возможности туризма жителей российской Арктики: внутри региона, в России и за рубежом // *Регионоведение*. 2024. Т. 32. № 4 (129). С. 712-732. URL: <https://regionsar.ru/tu/node/2276> (дата обращения: 18.11.2025). EDN: LXSHVB.
21. Зеленская Е.М. Гастрономический компонент в индустрии туризма // *Вестник Северного (Арктического) федерального университета*. 2015. № 03. С. 110-117 URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/gastronomicheskij-komponent-v-industrii-turizma/viewer> (дата обращения: 21.10.2025).
22. Карманова А.Е. Феномен привлекательности отдельных регионов Арктики для развития туристской индустрии // *Журнал правовых и экономических исследований*. 2020. № 4. С. 212-217. URL: <https://giefjournal.ru/node/1681> (дата обращения: 06.11.2025). EDN: UUQZTY.
23. Крылов П.М. Транспортно-географические особенности условий жизни населения городов и регионов России // *Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле*. 2019. Т. 29. № 4. С. 515–524. DOI: 10.35634/2412-9518-2019-29-4-515-524. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41688519> (дата обращения: 06.11.2025).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Статья подготовлена в рамках темы государственного задания Института географии РАН: «Социально-экономическое пространство России в условиях глобальных трансформаций: внутренние и внешние вызовы, № 124032900015–3 (FMWS-2024–0008)» (Волкова И.Н., Литвиненко Т.В.).

Financing: The article was prepared within the framework of the topic of the state assignment of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences: “Socio-economic space of Russia in the context of global transformations: internal and external challenges, No. 124032900015-3 (FMWS-2024–0008)” (Volkova I.N., Litvinenko T.V.).

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

УДК 913(1-925.121)
DOI 10.17513/use.38461

**ЭКОНОМИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ
ФОРМИРОВАНИЯ ГЕОКУЛЬТУРНОГО ПРОСТРАНСТВА ТАЙМЫРА**

Стрючкова Л.Н.

*Красноярская региональная общественная организация «Клуб исследователей Таймыра»,
Норильск, Российская Федерация, e-mail: liss888@mail.ru*

Формирование геокультурного пространства Таймыра – самого северного в мире участка материковой суши – происходило достаточно поздно, что обусловлено неблагоприятными климатическими условиями, труднодоступностью региона для человека. Цель исследования – показать, как на формирование геокультурного пространства Таймыра повлияли факторы экономического развития, обусловленные факторами географическими. В статье на основе сравнительно-географических, историко-географических и других данных показаны основные этапы освоения и заселения Таймыра, которые сыграли важную роль в формировании сегодняшних геокультурных образов территории, как и всего геокультурного пространства в целом. В течение 30 лет исследований автором были изучены более 500 источников, среди которых научные труды этнографов, географов, историков, археологов и др., также многочисленные документы из архивных фондов Государственного архива Красноярского края, Государственного архива Иркутской области, Таймырского окружного архива, Российского государственного архива экономики и многих других хранилищ страны. В данной статье использовано 28 источников. Кроме того, автор является жителем территории более 50 лет, участвует, а последние 20 лет организует экспедиции на Таймыре – краеведческие, с участием археологов (2016–2017 гг.), геофизиков (2017–2019 гг.) и других специалистов. Анализ накопленных материалов показывает, каким образом суровость климата и, соответственно, труднодоступность территории, связанная напрямую с географическими факторами, диктуют хозяйственно-экономическое освоение Таймыра, этнокультурные связи. Оленеводческая культура северных кочевников, с одной стороны, и создание жизнеобеспечивающей в условиях Крайнего Севера ресурсной инфраструктуры российским, а затем и советским государством, с другой стороны, в конечном счете не только формировали геокультурное пространство Таймыра, но и изменяли его с течением времени, дополняя новыми геокультурными образами.

Ключевые слова: Таймыр, геокультурное пространство, геокультурный образ, Хатангский тракт, пушнина, оленеводство, ресурсы

**ECONOMIC AND GEOGRAPHICAL FEATURES
OF THE FORMATION OF THE GEOCULTURAL SPACE OF TAIMYR**

Stryuchkova L.N.

*Krasnoyarsk Regional Public Organization “Taimyr Explorers Club”,
Norilsk, Russian Federation, e-mail: liss888@mail.ru*

The formation of the geocultural space of Taimyr, the world's northernmost mainland landmass, occurred relatively late due to unfavorable climatic conditions and the region's inaccessibility for humans. The purpose of this study is to explore how economic development factors influenced the formation of the geocultural space of Taimyr, which was influenced by geographical factors. Based on comparative geographical, historical geographical, and other data, the article highlights the key stages of the exploration and settlement of Taimyr, which played a significant role in shaping the current geocultural images of the territory and the geocultural space as a whole. Over the course of 30 years of research, the author has studied more than 500 sources, including scientific works by ethnographers, geographers, historians, archaeologists, and others, as well as numerous documents from the State Archives of the Krasnoyarsk Territory, the State Archives of the Irkutsk Region, the Taimyr District Archives, the Russian State Archives of Economics, and many other repositories across the country. This article uses 28 sources. In addition, the author has been a resident of the territory for over 50 years, and for the past 20 years, he has been organizing expeditions to Taimyr, including local history expeditions with archaeologists (2016–2017), geophysicists (2017–2019), and other specialists. The analysis of the accumulated materials shows how the harsh climate and, consequently, the inaccessibility of the territory, which is directly related to geographical factors, dictate the economic and social development of Taimyr and its ethno-cultural connections. The reindeer herding culture of the northern nomads, on the one hand, and the creation of a resource-based infrastructure for the Far North by the Russian and later Soviet state, on the other hand, ultimately not only shaped the geocultural space of Taimyr, but also changed it over time, adding new geocultural images.

Keywords: Taimyr, geocultural space, geocultural image, Khatanga tract, reindeer herding, fur, resources

Введение

Существующий сегодня географический образ Таймыра формировался в неблагоприятных для постоянного, оседлого проживания человека климатических условиях. Это продиктовано географическим

расположением региона: самая северная оконечность полуострова Таймыр – мыс Челюскин – является самой северной в мире точкой материковой суши. Освоение и заселение территории происходило в соответствии с природными циклами, что, в свою

очередь, обусловило определенные типы природопользования и хозяйствования. Соответственно, сформировавшееся геокультурное пространство всецело отразило характер освоения, свойственный районам Крайнего Севера.

Цель исследования – показать, как формирование геокультурного пространства Таймыра обусловлено факторами экономического развития региона, которое, в свою очередь, тесно связано с реалиями географического пространства.

Материалы и методы исследования

В статье использованы сравнительно-географические и историко-географические методы, результаты полевых исследований автора. В течение 30 лет были изучены более 500 источников, среди которых научные труды этнографов, географов, историков, археологов и др., также многочисленные документы из архивных фондов Государственного архива Красноярского края, Государственного архива Иркутской области, Таймырского окружного архива, Российского государственного архива экономики и многих других хранилищ страны. В данной статье использовано 28 источников из разных областей знаний. Это связано с отсутствием современных комплексных работ по географии исследуемого региона, поэтому идет обращение к различным частным наукам, которые вкупе позволяют проанализировать сложившуюся структуру геокультурного пространства.

Результаты исследования и их обсуждение

Геокультурные образы в современном прочтении

Симптоматично, что научное понятие «геокультура» отражает взаимосвязь социальной и культурной деятельности человека в частности и общества в целом в условиях глобального географического пространства [1, с. 4]. По образному выражению современных исследователей, «в диалоговой сфере природы и человека наиболее ярко проявляют себя социальный и экономический аспекты» [2, с. 11].

Что касается Арктики, освоение ее географического пространства человеком продиктовано в первую очередь экономическими интересами. Показательно, что сегодня в Российской Арктике создается около 20 % ВВП нашего государства и обеспечивается более четверти его экспорта [1, с. 12].

Таймыр можно назвать модельной территорией Крайнего Севера, так как географически он расположен равноудаленно от теплых течений Атлантического и Тихого океанов, является самой северной материковой сушей в мире, характеризуется наиболее неблагоприятными условиями для оседлого проживания. Как следствие, до X в. заходы человека в районы севера Средней Сибири были спорадическими и нерегулярными [3, с. 37].

При этом на Таймыре – в широтном направлении – сформировались различные по составу флоры и фауны природные зоны и подзоны: 1) зона полярных пустынь; 2) зона тундр (с подзонами); 3) лесотундра 4) зона северной тайги (также с подзонами) [4, с. 20]. Единое геокультурное пространство Таймыра, а также сформированные его геокультурные образы неразрывно связаны с указанными естественными характеристиками. В этой системе геокультурных образов и интерпретируются локальные (региональные) геокультурные пространства [5, с. 60].

Современное видение пространства как такового в географии подразумевает переход от метрической (количественной) парадигмы к топологическому (качественному) восприятию окружающего мира [6, с. 137]. Отсюда возникла потребность в исследовании не просто географического пространства, но пространства геокультурного – как территории, насыщенной культурными феноменами, как материальными, так и духовными (ментальными) [7, с. 61]. Это первое обращение к теме соотношения истории заселения и освоения Таймыра и его геокультурного пространства. Что неудивительно, так как само направление в географии, изучающее геокультурное пространство, а именно геокультурная география (или география культуры), стало активно развиваться только в начале XXI в. [8, с. 374].

Опираясь на концепции теоретика геокультурного пространства А.Г. Манакова, автор отмечает в основных характеристиках Таймыра его многослойность [9, с. 22] – формирование его происходило в несколько этапов, и для понимания этих процессов невозможно обойтись без исследования генезиса, «хотя бы он сам по себе непосредственно нас и не интересовал» [10, с. 20]. Многослойность может рассматриваться в разных аспектах, в данной статье автор рассматривает концепцию места с точки зрения видения ландшафта «как многослойной структуры, хранящей следы различных эпох» (место как палимпсест) [11, с. 3]).

*Автохтонная система
жизнеобеспечения на Таймыре*

Начиная с X в. основой обеспечения жизнедеятельности на севере Сибири стало домашнее оленеводство ненецкого типа. Именно северные самодийцы, примерно в X–XI вв. сформировавшиеся как самостоятельный этнос, создали домашнее оленеводство [12, с. 611]. Олень служил для кочевого народа и пищей, и одеждой, и жилищем, и другим необходимым сырьем для применения в бытовом и производственном (олeneводческом, промысловом) обиходе. Таким образом формировался первоначальный геокультурный образ населения Таймыра исключительно как кочевника-олeneвода.

Появившийся на Таймыре в XII–XIII вв. с юга, из современной Эвенкии, тунгусский компонент [13, с. 130] тоже был связан с миграциями популяции северного оленя, сегодня обозначаемой в научной литературе как таймырская популяция [14, с. 130]. Дикий северный олень (ДСО) мигрирует дважды в год, и его пути проходят через горный массив Средней Сибири – плато Путорана, являющееся северо-западной частью Среднесибирского плоскогорья. К лету – ущельями, удобными перевалами через огромное горное пространство, имеющее площадь 250 тыс. км², на тундровые просторы полуострова, к зиме – в обратном направлении в зону северной тайги [15, с. 19]. Основным фактором, определившим сезонные миграции ДСО с запада полуострова и с юга, являются олени пастбища, которые на Таймыре имеют самую большую олeneемкость в мире (до 850 тыс. голов [16, с. 12]). Кроме того, в ветреных тундрах на больших просторах не так доносится гнус – беспокоящий фактор для северного оленя.

Миграционные потоки меняются с течением времени, в силу разных причин. Сегодня основные миграционные потоки изменились практически у нас на глазах – ввиду воздействия новых экономических условий, пришедших в таймырскую тундру после развала СССР и почти полной утраты олeneводства как хозяйствования.

Домашнее олeneводство Таймыра перетерпело большие изменения после отката России от советских способов ведения устоявшихся практик на Крайнем Севере – в виде совхозов, колхозов, пушзаготовок и пр., начиная с 1990-х гг.

А изменение структуры популяции ДСО и ее половозрастного состава продиктовано в подавляющем большинстве бесконтроль-

ным и, соответственно, браконьерским истреблением – ради востребованных на черном рынке продуктов из наиболее ценных частей этого животного (панты, камус, языки). Присутствует и природный фактор. Так, потепление климата приводит к снижению массы лишайника, что негативно сказывается на олeneемкости традиционных пастбищ [17, с. 13]. Есть и другие факторы. Все это привело к тому, что к началу 2020-х гг. некогда самая большая популяция ДСО в мире – таймырская, доходившая до 1 млн особей [16, с. 3], – уменьшилась практически в 5 раз. Более того, избирательно-хищнический способ промысла, без необходимого учета половозрастной структуры популяции, наряду с другими – неантропогенными факторами – привел к полному исчезновению енисейской (западной) группировки [18, с. 10]. Эта часть популяции ДСО сыграла в свое время большую роль в формировании геокультурного пространства полуострова, так как на правобережье Енисея после X в. вслед за стадами оленя стали заходить и ненцы (самодийцы). На современном этапе наблюдается такой же показательный процесс: в связи с исчезновением приенисейской части популяции ДСО, с левобережья Енисея на территорию Таймыра снова начали заходить на лето ямальские ненцы со своими стадами [19, с. 46], которые до того предпочитали не рисковать, опасаясь увода дикими оленями своих домашних оленей.

Также указанные выше негативные процессы привели и к большому смещению на восток восточной группировки таймырской популяции [20, с. 36–39].

Все указанные процессы изменили образ олeneвода-кочевника, не считая короткого периода трансформации образа в советское время, когда личные хозяйства были заменены олeneводческими бригадами, колхозами и совхозами. С окончанием советского периода добавились и такие негативные процессы, как утрата домашнего олeneводства, ухудшение снабжения поселков [21, с. 9], где сегодня концентрированно живут представители коренных малочисленных народов Севера.

Негативные последствия развала СССР сегодня приобретают еще один неожиданный аспект. Речь о льготах, которые государство предоставляет представителям коренных малочисленных народов севера, продолжающих вести традиционный образ жизни. А именно, некоторые исследователи считают, что «льготирование людей вно-

сит раскол в этнические сообщества. Часть сообщества считает, что льготы и компенсации слишком ничтожны и надо их расширять и увеличивать, а часть полагает, что льготы – это медвежья услуга, которая развращает народ, превращая его в вечного попрошайку» [22, с. 184].

Среди коренных этносов Таймыра оленеводством продолжают заниматься только ненцы, есть небольшие стада на востоке и у долган-оленьеводов.

Появление оседлого населения на Таймыре

Близкое знакомство русских с предками современных ненцев, основоположников домашнего оленеводства, относится ко времени активного освоения Сибири Российским государством. Экономическим двигателем в тот период выступают природные ресурсы, а именно – пушные богатства территории, в том числе и севера Сибири, в частности песец. Именно тогда, считается, активно продвигаясь на восток, шли за русскими и самоеды, в основном из-за дополнительного «заработка»: государевы служащие, помимо обязательного налога, принимали и сверх того добытые шкурки, обменивая на блага цивилизации (порох, мука, металл и пр.).

А некоторые, наоборот, уходили подальше от притеснений ясачных сборщиков и государственных обязанностей. Так, во второй половине XVII в. часть самодийцев, называвшаяся пясидской самоедью, ушла с Пясины на реку Хета (юго-восток Таймыра), избегая уплаты налога представителям государства [23, с. 80].

При появлении экономического интереса в виде закупок пушнины представителями государства охотничий промысел и для тунгусов приобрел несколько большее значение.

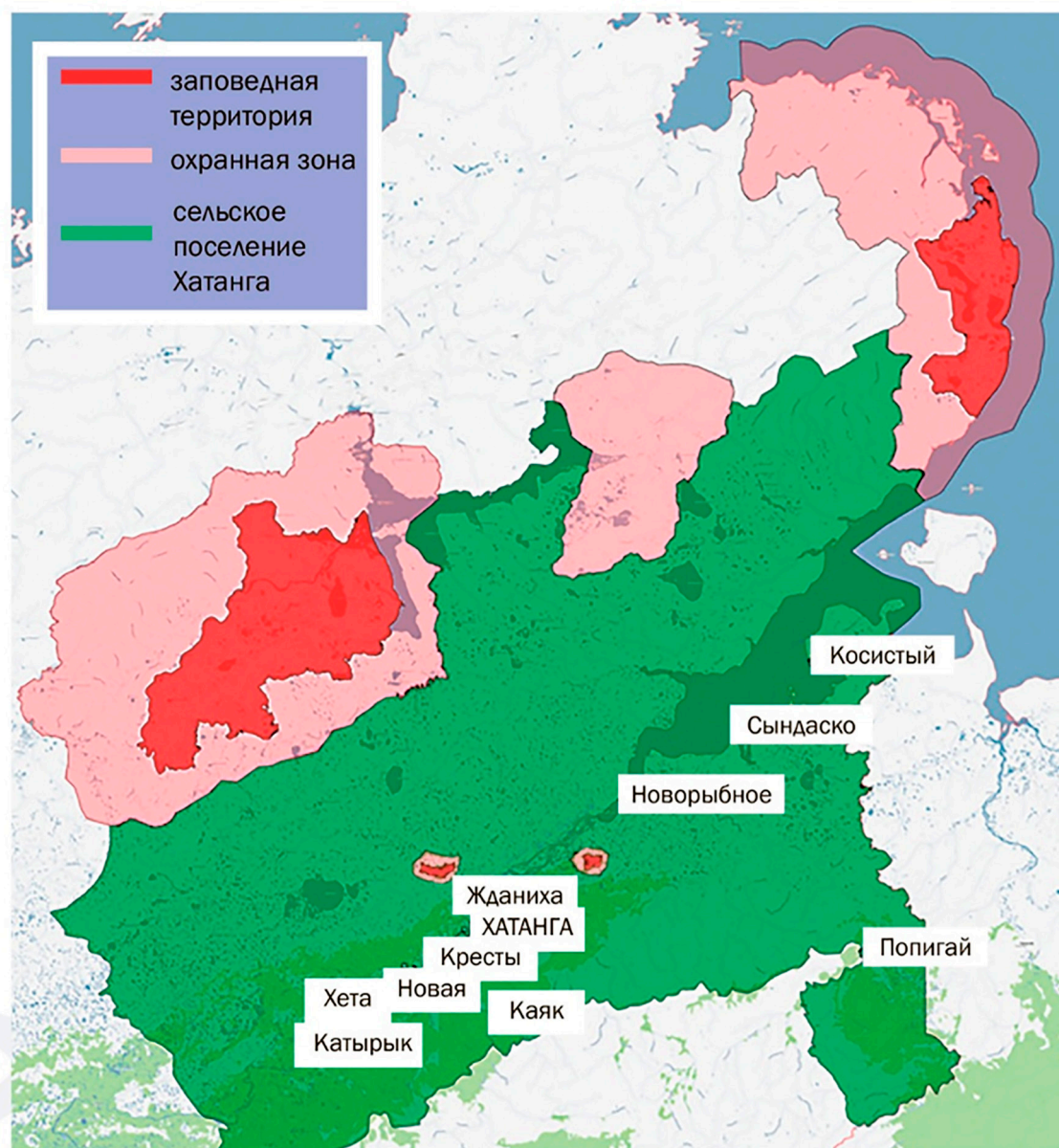
Начался процесс заселения севера Средней Сибири [24, с. 24]. Этот многовековой опыт (начиная с рубежа XVI–XVII вв.) показывает, что без ресурсной поддержки государства оседлая жизнь на Крайнем Севере невозможна. В отличие от кочевого образа жизни, оседлость подразумевает наличие постоянно возобновляемых на одном месте источников системы жизнеобеспечения, необходимых для воспроизводства пищи, поддержания теплого жилища в условиях минусовых температур в течение большого периода года и т.д. Также необходимы упомянутые выше металл, порох, мука, средства добычи огня и пр.

Ресурсная поддержка государства и в XVII в., и сейчас формируется благодаря так называемому северному завозу. Это комплекс мероприятий и финансовых механизмов по регулярному и бесперебойному снабжению территорий, относящихся к районам Крайнего Севера, а также приравненных к ним местностей с ограниченными сроками завоза грузов. В этом смысле снабжение хлебозапасных магазинов, в которых несли государеву службу вахтеры (так называлась должность смотрителя этого учреждения до Октябрьской революции), ничем не отличается от современного снабжения, разве что технологическими и техническими средствами.

Расположение таких объектов инфраструктуры сформировалось в определенной ландшафтной зоне. Хатангский тракт прошел вдоль северных отрогов плато Путорана и плато Анабар. С одной стороны, потому что пролегают идущие в нужном направлении водные артерии, по которым можно передвигаться с запада полуострова в восточном направлении с минимальными волоками (в холодный период года они становятся зимниками, зимними дорогами), с другой стороны, потому что именно в лесотундровой и северотаежной зоне отсутствуют наименее экстремальные, по сравнению с тундрой, условия круглогодичного проживания – для поддержания бесперебойного функционирования зимника. И сегодня инфраструктура Таймыра в основе своей расположена там же (рисунок).

Для обслуживания Хатангского тракта были построены остановочные пункты (станки), где можно было переночевать, поменять гужевого транспорт. В условиях заполярной зимы расстояние, которое преодолевалось за короткий световой день, составляет 20–30 км. Вот примерно на таком расстоянии вдоль Хатангского тракта была сформирована сеть станков – русских поселений, обеспечивающих транспортную связь (замена оленей, собак), подводную гоньбу, обывательскую связь.

Благодаря пушным промыслам, инфраструктура развивалась далее. Орудия охотничьего промысла (пасти, кулёмы) находились друг от друга на приличном расстоянии, а у затундринских крестьян их количество могло доходить до 250 шт., и обходить приходилось большую площадь. Поэтому промысловики в своих владениях ставили небольшие строения, которые назывались отъезжими избами на расстоянии также дневного перехода, 20–30 км друг от друга.



*Современное распределение поселений вдоль старинного Хатангского тракта
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования*

В типологическом восприятии Туруханского края (к нему вплоть до послереволюционных административных реформ XX в. относился Таймыр) появляется образ оседлого жителя – промысловика. К образам Таймыра добавляется «мягкое золото» как неотъемлемая часть геокультурного брендинга территории.

Недропользование современного этапа

В первой трети XX в., как отмечено в архивных документах, никакого снабжения поселений, нарушенного Октябрьской революцией, практически не осталось, пе-

ревозки жители станков осуществляли, скорее, в силу привычки. И постепенно тундра начала пустеть: без активного обеспечения деятельности оседлая жизнь на станках замерла. Только после нескольких лет советской власти обеспечение вернулось на Таймыр, сначала в виде интегральных коопераций. Началось это практически одновременно с образованием новой административной единицы в 1930 г. – Таймырского Долгано-Ненецкого автономного округа.

Развитие советской системы хозяйствования привнесло в тундру не только измененные составляющие ведения сельского

хозяйства, но и развитие промышленности – с 1930 г., на основе геологических экспедиций 1919–1928 гг., началось строительство Норильского меде-никелевого комбината, являющегося сегодня крупнейшим горно-металлургическим предприятием в мире, производящим в том числе металлы платиновой группы, редкоземельные металлы. Хотя начало следующего этапа в формировании нового геокультурного образа Таймыра можно отнести к 1960-м гг. [25, с. 222] – к этому периоду относятся первые, неудачные, попытки создать промышленное производство.

Достаточно быстро процесс освоения пошел после первой трети XX в., сформировав новые неотъемлемые образы современного Таймыра – промышленная мощь и человек-созидатель, которому открылись богатейшие недра и который сумел создать уникальное горно-металлургическое производство, аналогов которому до сих пор в мире не существует. В формировании этих геокультурных образов важную роль играет тот факт, что такая производственная деятельность была организована в крайне неблагоприятных климатических условиях, на Крайнем Севере.

Вместе с развитием производства создавался новый социокультурный объект – Норильский промышленный район, представляющий собой конгломерат технических и гражданских сооружений, то есть конгломерат производства и города, с его архитектурой и всеми иными вытекающими. Сформированное за последнее столетие геокультурное пространство Таймыра стало, пользуясь терминологией кандидата географических наук, доктора культурологии Д.Н. Замятина, обобщенным единством геокультурных образов холода, снега, льда, ветра, редкой растительности, затрудненных транспортных коммуникаций и общения, специфических архитектурных и планировочных решений [26, с. 219], с несколько отходящими в прошлое геокультурными образами оленевода-кочевника и промысловика – оседлого жителя.

Однако процессы освоения и сегодня затруднены суровостью естественных характеристик региона. Неудивительно, что долгое время освоен был в производственном отношении в основном юг Таймыра, там, где и возник Норильский промышленный район. Новый пик развития в этой сфере приходится только на последние два десятилетия. Лишь с 2000-х гг. на Таймыр стали активно заходить нефте- и газодобывающие

компании. В перспективе ожидается новый мощный агломерационный узел. Так, один лишь проект «Восток Ойл» на конец апреля 2021 г. включал 52 лицензионных участка [27, с. 187].

Сегодня добывающая промышленность (добыча угля, сырой нефти и газа) составляет 32,6 % в районной экономике [28, с. 12].

Заключение

Сложная компонентная и морфологическая структура геокультурного пространства была рассмотрена нами всего в нескольких аспектах. Автор рассмотрел его в пространственно-временной динамике в качестве концептуальной модели палимпсеста.

Безусловно, суровость климата диктует хозяйственно-экономическое освоение территории Таймыра. Во времени и пространстве наблюдается генезис различных элементов освоения и заселения территории полуострова.

Формирование оленеводческих культур, посещавших основные тундры Таймыра сезонно, на долгое время определило образы геокультурного пространства, характерные для территории с минимальным воздействием человека.

Достаточно позднее появление оседлого населения, также в силу климатических особенностей территории, привнесло новые данные для изменения устоявшегося сезонного, практически безлюдного региона. Именно с XVII в. началось активное формирование нового слоя геокультурного пространства Таймыра.

Появление уже в советское время мощного производственного узла снова привнесло некоторые изменения в структуру геокультурного пространства и дополнило его новыми геокультурными образами.

В результате интерпретация Таймыра как территории оленеводов-кочевников и промысловиков, царства холода, льда и снега обогатилась новыми геокультурными образами. Сегодня в современном геокультурном пространстве севера Средней Сибири присутствует также образ полярника-первооткрывателя как основы не только освоения и заселения труднодоступных и неблагоприятных в климатическом отношении территорий Крайнего Севера, но и создания здесь мощнейших технологических производств с появлением селитебных территорий.

Список литературы

1. Сухоруков В.Д., Гладкий Ю.Н. Геокультурные лики Русского мира: учебно-просветительский модуль / Российский государственный педагогический университет им.

- А.И. Герцена. СПб.: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена, 2022. 40 с. EDN: OUCЕОН. ISBN 978-5-8064-3138-8.
2. Гладкий Ю.Н., Сухоруков В.Д. Экологическое равновесие географического пространства // Современные географические и междисциплинарные исследования: коллективная монография / отв. ред. Д.А. Субетто, А.Н. Паранина. СПб.: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена, 2019. 188 с. EDN: UWUWGK. ISBN 978-5-8064-2797-8.
3. Русские люди на Таймыре в XVII–XVIII столетиях / П.Н. Барахович, Д.Н. Лысенко, Н.С. Степанов, М.В. Михайлова. Красноярск: «ЛИТЕРА-принт», 2023. 112 с. EDN: CUVLTF. ISBN 978-5-907558-53-3.
4. Якушкин Г.Д., Колпашиков Л.А., Поспелов И.Н., Поспелова Е.Б. Живая природа Таймыра. Норильск, 2021. 272 с. ISBN 978-5-6042673-5-6.
5. Замятин Д.Н., Курилова С.Н., Дьяконова В.Е. Геокультурный брендинг арктических территорий (на примере моделирования базового географического образа тундры) // Этнографическое обозрение. 2016. № 4. С. 60–74. EDN: WIEODN.
6. Сухоруков В.Д., Гладкий Ю.Н. К вопросу о научной экспликации географического пространства // Региональные геосистемы, 2021. Т. 45. № 2. С. 133–143. EDN: MAXILY.
7. Григорьев Ал.А., Паранина Г.Н. Культурная география: шаг к истокам? // Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. 7. Вып. 3. СПб., 2011. С. 60–72. EDN: OCRBUP.
8. Стрелецкий В.Н., Горохов С.А. Специфика и тенденции развития культурной географии в России в начале XXI века // Известия Российской академии наук. Серия географическая, 2022. Т. 86. № 3. С. 374–392. EDN: LSPWGS. DOI: 10.31857/S2587556622030141.
9. Манаков А.Г. Структура геокультурного пространства России: подходы к делимитации // Псковский региональный журнал. 2012. № 14. С. 22–35. EDN: QCVMRB.
10. Зеленев Е.И. Геокультурное пространство и геокультурные поля: теория вопроса // Вестник Санкт-Петербургского университета. 2009. С. 19–28. EDN: MBWQTJ.
11. Басик С.Н. Имя и место: топонимический палимпсест в геокультурном пространстве // Современные проблемы территориального развития. 2018. № 3. С. 1–15. EDN: XZTHBR.
12. Народы мира: этнографические очерки. М. – Л. : Изд-во АН СССР, 1956. 1084 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://djuvonline.file/G8r9tq0DKYcCa> (дата обращения: 29.12.2025).
13. Туголуков В.А. Тунгусы (эвенки и эвены) Средней и Западной Сибири. М.: «Наука», 1985. 288 с. EDN: RAOEEZ.
14. Колпашиков Л.А., Бондарь М.Г., Михайлов В.В., Соболевский В.А. Опыт распознавания и определения численности северных оленей (*Rangifer Tarandus*) с использованием технологии автоматизированного машинного обучения AutoML // Вестник охотоведения. 2023. Т. 20. № 3. С. 129–138. EDN: GMPJBW.
15. Колпашиков Л.А., Михайлов В.В. Проблемы охраны и рационального использования диких северных оленей Таймырской популяции в современных социально-экономических условиях // Научные труды Федерального государственного бюджетного учреждения «Объединенная дирекция заповедников Таймыра» / отв. ред. Л.А. Колпашиков, А.А. Романов. Норильск: «АПЕКС», 2015. С. 17–29. EDN: ZTVFQN. ISBN 978-5-93-633-121-3.
16. Колпашиков Л.А. Таймырская популяция дикого северного оленя (биологические основы управления и устойчивого использования ресурсов): дис. ... докт. биол. наук. Норильск, 2000. 379 с. EDN: QDGLSF.
17. Колпашиков Л.А., Бондарь М.Г., Михайлов В.В. Современная история таймырской популяции дикого северного оленя: динамика, управление, угрозы и пути сохранения // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. 2019. № 11. С. 5–20. DOI: 10.17076/eco1045. EDN: BPDWNP.
18. Бондарь М.Г., Колпашиков Л.А. Таймырская популяция дикого северного оленя в изменяющихся условиях среды обитания // Научный вестник Арктики. 2019. № 6. С. 8–15. EDN: QIGTDL.
19. Колпашиков Л.А., Михайлов В.В. Факторы, определяющие динамику численности таймырской популяции диких северных оленей // Вестник охотоведения. 2024. Т. 21. № 1. С. 41–50. EDN: CMVERT.
20. Бондарь М.Г., Колпашиков Л.А. Оценка численности и летнее размещение таймырской популяции диких северных оленей в 2017 году // Научные труды Федерального государственного бюджетного учреждения «Объединенная дирекция заповедников Таймыра» / отв. ред. М.Г. Бондарь. Норильск: АПЕКС, 2018. Вып. 2. С. 29–45. EDN: AJHETC. ISBN 978-5-93633-142-8.
21. Давыдов В.Н. «У каждого свои секреты»: стратегии поддержания пищевой автономности на Таймыре // Этнография, 2022. № 1 (15). С. 6–27. DOI: 10.31250/2618-8600-2022-1(15)-6-27. EDN: ATVFVO.
22. Перевалова Е.В., Киссер Т.С. Коренные народы Таймыра: «право жить на своей земле» // Вестник археологии, антропологии и этнографии. 2022. № 4 (59). С. 180–188. DOI: 10.20874/2071-0437-2022-59-4-15. EDN: CIKEWJ.
23. Дьяченко В.И. Пути и особенности колонизации русскими Таймыра // Сибирь в контексте русской модели колонизации (XVII – начало XX в.): сборник научных статей. СПб.: МАЭ РАН, 2014. С. 68–123. EDN: VIRGFH.
24. Дьяченко В.И. Влияние Хатангского тракта на формирование долган как культурно-сложного общества // Znanstvena Misel, 2020. № 38–2 (38). С. 23–27. EDN: QRDGYA.
25. Стрючкова Л.Н. Геологические экспедиции 1915 и 1919 гг. к Норильским горам, которые не стали отправной точкой для истории промышленного Норильска / Освоение Севера: от прошлого к будущему. М., 2021. С. 221–229. EDN: FHBBDK.
26. Замятин Д.Н. Постурбанизм и холод: геокультурные образы и репрезентации культурных ландшафтов северных и арктических городов // Вестник археологии, антропологии и этнографии. 2020. № 4 (51). С. 218–227. DOI: 10.20874/2071-0437-2020-51-4-19. EDN: AZEIVK.
27. Перевалова Е.В., Киссер Т.С. Недропользователи и коренное население Таймыра: партнерство и проектность // Сибирские исторические исследования. 2022. № 4. С. 176–194. DOI: 10.17223/2312461X/38/10. EDN: ZSZJMN.
28. Головнев А.В., Давыдов В.Н., Перевалова Е.В., Киссер Т.С. Этноэкспертиза на Таймыре: коренные народы и техногенные вызовы. СПб.: МАЭ РАН, 2021. 284 с. EDN: EFPZIH. ISBN 978-5-88431-396-5.

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The author declares that there is no conflict of interest.

СТАТЬИ

УДК 631.412(571.12)
DOI 10.17513/use.38462

**ПРОФИЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАКРОЭЛЕМЕНТОВ
В СЕРЫХ И ТЕМНО-СЕРЫХ ПОЧВАХ
ЮГА ТЮМЕНСКОЙ ОБЛАСТИ**

**Земцова Е.С. ORCID ID 0000-0002-0093-9064,
Якимов А.С. ORCID ID, 0000-0002-1303-8492,
Токарева А.Ю. ORCID ID 0000-0003-1727-1408,
Колобов А.П. ORCID ID 0000-0001-7239-959X,
Алимова Г.С. ORCID ID 0000-0001-6275-6143**

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Тобольская комплексная научная станция» Уральского отделения Российской академии наук,
Тобольск, Российская Федерация, e-mail: zemcovaelena@mail.ru*

Цель исследования – изучение закономерностей профильного распределения макроэлементов (Fe, Al, K, Na, Ca, Mg, Mn, P) в целинных серых и темно-серых почвах Зауралья для углубления понимания их генезиса и оценки агроэкологического потенциала. Исследование выполнено на основе анализа восьми почвенных профилей, заложенных на особо охраняемых природных территориях регионального значения (заказники и памятники природы) в природных зонах (подзонах) южной тайги, подтайги и северной лесостепи Тюменской области. Проведено морфологическое описание, определение гранулометрического состава, массовой доли органического вещества и содержания макроэлементов методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой после экстракции смесью азотной (HNO₃) и соляной (HCl) кислот («царская водка»). Выявлена элювиально-иллювиальная дифференциация Fe и Al, с аккумуляцией в текстурном горизонте (прирост содержания до 157 и 125 % соответственно), связанная с процессом лессиважа и подтверждаемая корреляцией с содержанием глины ($r = 0,58$). Доказано биогенное накопление P и Mn в органогенных горизонтах, проявляющееся в тесной связи с органическим веществом ($r = 0,81$ и $r = 0,73$ соответственно). Установлены различия в миграционной способности Ca и Mg при близких коэффициентах биологического поглощения, а также относительно равномерное распределение K по профилю вследствие баланса биогенной аккумуляции и минералогического запаса. Распределение Na подтверждает периодически промывной режим исследуемых почв.

Ключевые слова: серые и темно-серые почвы, юг Тюменской области, макроэлементы, профильное распределение, геохимия почв

**PROFILE DISTRIBUTION OF MACROELEMENTS IN GRAY
AND DARK GRAY SOILS OF SOUTH OF THE TYUMEN REGION**

**Zemtsova E.S. ORCID ID 0000-0002-0093-9064,
Yakimov A.S. ORCID ID, 0000-0002-1303-8492,
Tokareva A.Yu. ORCID ID 0000-0003-1727-1408,
Kolobov A.P. ORCID ID 0000-0001-7239-959X,
Alimova G.S. ORCID ID 0000-0001-6275-6143**

*Federal State Budgetary Institution of Science “Tobolsk Integrated Scientific Station”
of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Tobolsk, Russian Federation,
e-mail: zemcovaelena@mail.ru*

The purpose of the study is to study the patterns of profile distribution of macroelements (Fe, Al, K, Na, Ca, Mg, Mn, P) in virgin gray and dark gray soils of the Trans-Ural region to deepen the understanding of their genesis and assess the agroecological potential. The study was carried out based on the analysis of 8 soil profiles laid in specially protected natural areas of regional significance (nature reserves and natural monuments) in the southern taiga, subtaiga and northern forest-steppe zones (subzones) of the Tyumen region. A morphological description was carried out, the particle size distribution, the mass fraction of organic matter and the content of macroelements were determined using atomic emission spectrometry with inductively coupled plasma after extraction with a mixture of nitric (HNO₃) and hydrochloric (HCl) acids («Aqua regia»). Eluvial-illuvial differentiation of Fe and Al with accumulation in the textured horizon was revealed (increase in content up to 157 % and 125 %, respectively), associated with the process of loessivage and confirmed by correlation with clay content ($r = 0,58$). Biogenic accumulation of P and Mn in organogenic horizons has been proven, which manifests itself in close connection with organic matter ($r = 0,81$ and $r = 0,73$, respectively). Differences in the migration ability of Ca and Mg at similar biological absorption coefficients were established, as well as a relatively uniform distribution of K along the profile due to the balance of biogenic accumulation and mineralogical reserve. The distribution of Na confirms the periodically leaching regime of the studied soils.

Keywords: gray and dark gray soils, south of the Tyumen region, macroelements, profile distribution, soil geochemistry

Введение

Почва имеет ярко выраженную пространственную неоднородность, которая проявляется в двух основных направлениях: вертикальном и горизонтальном [1, с. 6–14]. Вертикальная неоднородность выражается в формировании генетических горизонтов с различными свойствами [2, с. 180–193]. Горизонтальная неоднородность формируется под влиянием комплекса факторов почвообразования (почвообразующая порода, рельеф, климат, флора и фауна, время), создающих сложную пространственную мозаику даже на небольших расстояниях и может быть как нивелирована, так и усилена антропогенным воздействием [1, с. 22–37]. Учет этого свойства является критически важным для эффективного земледелия, экологического мониторинга и землеустройства.

Почва представляет собой сложную полихимическую систему, в которой содержание отдельных химических элементов может различаться в тысячи раз и более, а сами элементы могут находиться в составе различных по природе и растворимости соединениях, унаследованных от почвообразующей породы или сформированных в процессе почвообразования [3, с. 3].

Почвенный покров юга Тюменской области (без автономных округов) отличается значительным разнообразием, среди зональных типов серые и темно-серые почвы [4, с. 72, 74] занимают второе место по площади после подзолистых – почти 1 млн га (около 6,3% территории) [5; 6, с. 91]. Их ареалы формируются в лесостепной и подтаежной зонах, а также частично заходят в южную тайгу. Они приурочены к дренированным участкам водоразделов и верхней части склонов под березовыми или березово-осиновыми лесами [7].

Высокий агрономический потенциал серых и темно-серых почв Северного Зауралья исторически обусловил их активное сельскохозяйственное использование. К концу XX в. в пашню было вовлечено более 80% их площади [6, с. 91]. В настоящее время они рассматриваются как перспективный резерв для расширения пахотного фонда [1, с. 43; 8]. Благоприятные свойства этих почв связаны с почвообразующими породами региона – лессовидными и покровными суглинками, содержащими карбонаты кальция, которые ограничивают развитие оподзоливания [6, с. 75]. Однако данные агрохимического обследования пашен фиксируют крайне неоднородный характер базовых свойств серых и темно-серых почв, что значительно усложняет их идентифи-

кацию и разработку научно обоснованных мероприятий по сохранению и повышению плодородия [1, с. 3; 9].

Несмотря на обширную изученность морфологических и основных физико-химических свойств серых и темно-серых почв Зауралья [1, с. 152–154; 10], профильное распределение в них макроэлементов остается недостаточно изученным.

Цель исследования – установление закономерностей данного процесса.

Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования выбраны целинные серые и темно-серые почвы, которые никогда не использовались в пашне. Исследования проводились в 2024 г. на территории особо охраняемых природных территорий (ООПТ) регионального значения (заказники и памятники природы) в зонах (подзонах) южной тайги, подтайги и северной лесостепи, где было заложено восемь почвенных разрезов (рис. 1). В каждом из них изучено морфологическое строение почвенного профиля и выполнен погоризонтный отбор образцов для последующего лабораторного анализа.

Морфологическое строение изученных почв представлено последовательно сменяющимися генетическими горизонтами, в соответствии с типом почвы.

Профиль серой почвы в разрезе 1: грубогумусовый горизонт (АО) (0–6(9) см) → серогумусовый горизонт (АУ) (6(9)–24 см) → серогумусово-текстурный горизонт (АУВТ) (24–49 см) → текстурный (ВТ) (49–71(75) см) → переходный горизонт (ВТС) (71(75)–95 см) → почвообразующая порода (С) (95–115 см).

Профиль серой почвы в разрезе 2: АО (0–7(9) см) → АУ (7(9)–18(20) см) → АУВТ (18(20)–32(52) см) → ВТ1 (32(52)–72 см) → ВТ2 (72–100 см) → С (100–125 см).

Профиль серой почвы в разрезе 3: АО (0–7(11) см) → АУ (7(11)–18(20) см) → АУВТ (18(20)–27(32) см) → ВТ (27(32)–60 см) → С (60–90 см).

Профиль серой почвы в разрезе 4: АО (0–8 см) → АУ (8–15(29) см) → АУВТ (15(29)–30(35) см) → ВТ (30(35)–68 см) → С (68–100 см).

Профиль темно-серой почвы в разрезе 5: грубогумусовый горизонт (АО) (0–7(8) см) → темnogумусовый горизонт (АУ) (7(8)–20(24) см) → темnogумусово-текстурный горизонт (АУВТ) (20(24)–51(62) см) → текстурный глееватый горизонт (ВТg) (51(62)–72 см) → почвообразующая глееватая порода (Сg) (72–100 см).

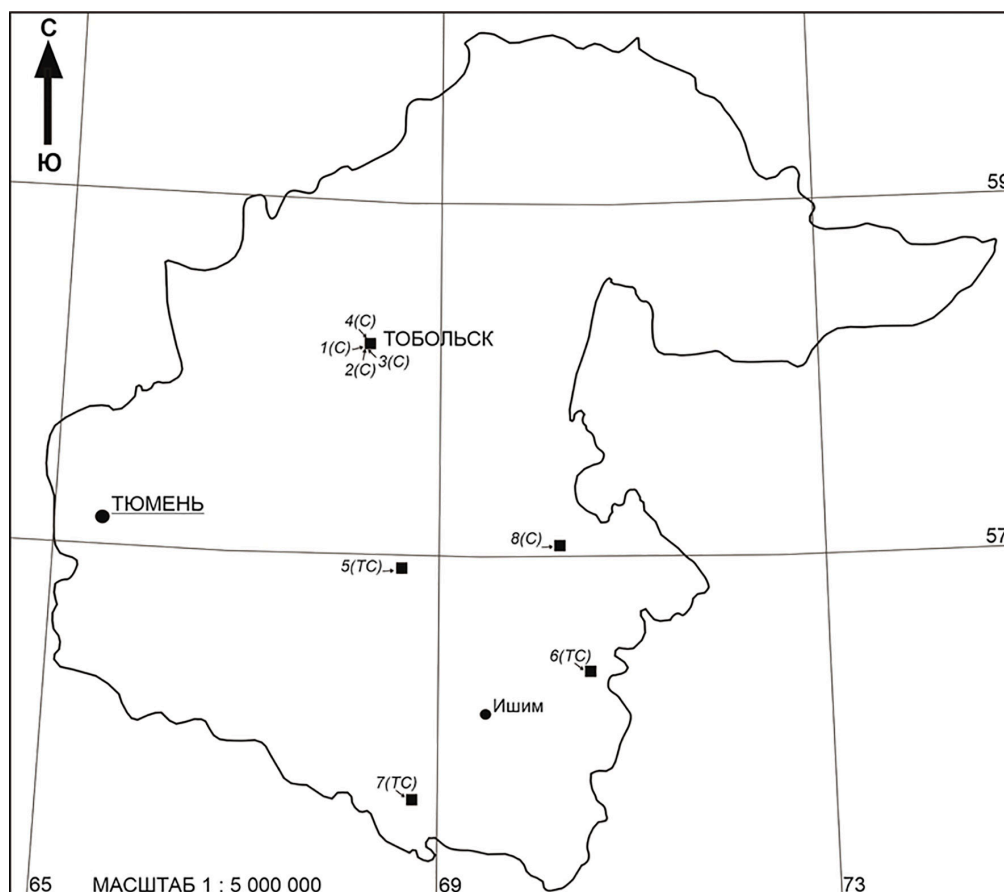


Рис. 1. Местоположение почвенных разрезов: 1 – памятник природы «Киселевская гора с Чувашиским мысом»; 2, 3 – памятник природы «Окрестности дома отдыха “Тобольский”»; 4 – экологическая тропа в г. Тобольске; 5 – заказник «Алабуга»; 6 – заказник «Ереминский»; 7 – памятник природы «Озеро Соленое»; 8 – заказник «Викуловский». Буквами обозначен тип почвы: С – серая, ТС – темно-серая

Профиль темно-серой почвы в разрезе 6: АО (0–8 см) → АУ (8–24 см) → АУВТ (24–38 см) → ВТ (38–72 см) → С (72–100 см).

Профиль темно-серой почвы в разрезе 7: АО (0–10(11) см) → АУ (10(11)–28(30) см) → АУВТ (28(30)–40(45) см) → ВТ (40(45)–67 см) → С (67–100 см).

Профиль серой почвы в разрезе 8: АО (0–7 см) → АУ (7–13(15) см) → (АУВТ) (13(15)–30(34) см) → ВТ (30(34)–45 см) → С (45–68 см).

Все лабораторные исследования выполнены в химико-экологической лаборатории Тобольской комплексной научной станции УрО РАН.

Отобранные образцы высушивали до воздушно-сухого состояния при комнатной температуре, после чего растирали в фарфоровой ступке пестиком и просеивали через сито с диаметром ячеек 1 мм (для анализа элементного состава) и 2 мм (для анализа других физико-химических свойств).

Определяли гранулометрический состав почв по методу Рутковского, массовую долю органического вещества – фотометрическим методом [11].

Для определения валового содержания макроэлементов проводили кислотное разложение проб в системе микроволновой пробоподготовки MWS-2 speedwave (Berghof, Германия). Навеску почвы массой 4,0 г обрабатывали 6 мл конц. HCl и 2 мл конц. HNO₃ («царская водка») в автоклавах DAP-60K. Разложение проводили по трехступенчатой программе: 1) нагрев до 150 °С в течение 10 мин (мощность 80 %); 2) выдержка при 180 °С в течение 25 мин (мощности 80 %); 3) охлаждение до < 100 °С в течение 10 мин (мощность 40 %).

После охлаждения содержимое автоклавов количественно переносили в мерные колбы на 50 мл, доводя объем до метки дистиллированной водой. Ввиду неполного разложения силикатной матрицы суспензии

фильтровали через обеззоленный фильтр «синяя лента». Для минимизации матричных эффектов и приведения концентраций элементов в линейный диапазон калибровки проводили дополнительное разбавление фильтрата в 50 раз.

Определение концентраций элементов (Al, Fe, Mg, Ca, K, Na, Mn, P) проводили методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой на спектрометре Optima 7000DV (PerkinElmer, США). Измерения выполняли при следующих аналитических длинах волн (нм): Al – 308,215, Fe – 239,562, Mg – 279,077, Ca – 315,887, K – 766,490, Na – 589,592, Mn – 259,372, P – 213,617.

Статистическую обработку и визуализацию данных проводили с помощью программного обеспечения Statistica StatSoft. В качестве описательных статистик использовали медиану, верхний и нижний квартили, минимальное и максимальное значения. При оценке связей между признаками применяли коэффициент ранговой корреляции Спирмена. Критический уровень статистической значимости принимали равным 0,05.

Результаты исследования и их обсуждение

Установлено, что в исследованных серых и темно-серых почвах концентрации железа и алюминия закономерно нарастают вниз по профилю (рис. 2), достигая максимума в текстурном горизонте (BT) или почвообразующей породе (C). Количественно это выражается в следующих значениях медиан (мг/кг) по генетическим горизонтам (АО-AY(AU)-AYBT(AUBT)-BT-C):

Fe: 19045 → 21750 → 27080 → 34040 → 33110 мг/кг,

Al: 21615 → 23330 → 26285 → 29115 → 30660 мг/кг.

Судя по медианам, содержание Fe в горизонте BT по отношению к горизонту AY(AU) составляет 157%, а Al – 125%. Выявленная аккумуляция согласуется с литературными данными [6, с. 81].

В верхних горизонтах серых и темно-серых почв активные процессы разложения органического вещества и гумификации сопровождаются образованием подвижных фульвокислот. Данные соединения разрушают первичные минералы, переводя Fe и Al в подвижные формы, которые мигрируют вниз по профилю с нисходящими токами воды. В текстурном горизонте (BT) происходит осаждение мигрирующих соединений, чему способствует изменение фи-

зико-химических условий и более тяжелый гранулометрический состав горизонта: глинистые частицы обладают высокой поглощательной способностью и создают узкопористую структуру, которая задерживает коллоидные взвеси, обогащенные Fe, Al и илистой фракцией. В результате текстурный горизонт уплотняется и приобретает более яркую красно-коричневую окраску, обусловленную аккумуляцией оксидов железа (III). Экспериментальные данные подтверждают высокое содержание глинистой фракции в иллювиальной части профиля – медианные значения по генетическим горизонтам составили: 25 → 21 → 19 → 36 → 34%. Тяжелые почвы по сравнению с легкими имеют богатый минералогический состав, содержат больше валовых и подвижных элементов [12–14]. Определены положительные корреляции средней силы между содержанием глины и концентрациями Fe ($r = 0,58$) и Al ($r = 0,58$).

Низкое содержание Fe и Al в органогенных горизонтах по сравнению с почвообразующей породой связано со слабой биологической аккумуляцией. Это подтверждается коэффициентами биологического поглощения, не превышающими единицу. Согласно литературным данным [15, с. 64–65] исследованные макроэлементы по интенсивности биологического накопления образуют следующий ряд: P (55) >> Mn (7,0), K (7,0) > Ca (3,0) > Mg (2,9) > Na (0,8) > Al (0,2) > Fe (0,06).

Особенности распределения натрия в серых и темно-серых почвах обусловлены периодически промывным типом водного режима, исключающим аккумуляцию легкорастворимых солей в почвенном профиле. В этих условиях Na, обладающий высокой миграционной способностью, легко выносятся за пределы почвенной толщи почвенно-грунтовыми водами. Результаты исследования свидетельствуют о низких концентрациях Na по всему профилю, при этом наблюдается тенденция к росту его содержания с глубиной, что отражается в медианных значениях по генетическим горизонтам: 140 → 128 → 175 → 194 → 246 мг/кг.

В профильном распределении калия не выявлено резкого выноса или аккумуляции в каком-либо горизонте. Его содержание остается относительно стабильным по всему профилю, медианы по горизонтам составили: 3818 → 3105 → 3094 → 4043 → 4150 мг/кг. Будучи ключевым биогенным элементом, K активно поглощается растительностью и возвращается в верхние горизонты с опадом. Этот постоянный цикл

поддерживает его запасы в гумусовой части профиля, компенсируя потенциальные потери от выщелачивания. Значительная часть К входит в состав устойчивых к выветриванию первичных минералов (полевых шпатов, слюд), которые служат долговременным «буферным» резервом элемента, особенно в почвообразующей породе. Способность глинистых минералов поглощать

и прочно удерживать ионы К в кристаллической структуре дополнительно иммобилизует элемент, предотвращая его вымывание нисходящими токами влаги. Таким образом, стабильность профильного распределения К является результатом динамического равновесия между его биогенной аккумуляцией в верхних горизонтах и минералогическим запасанием по всей почвенной толще.

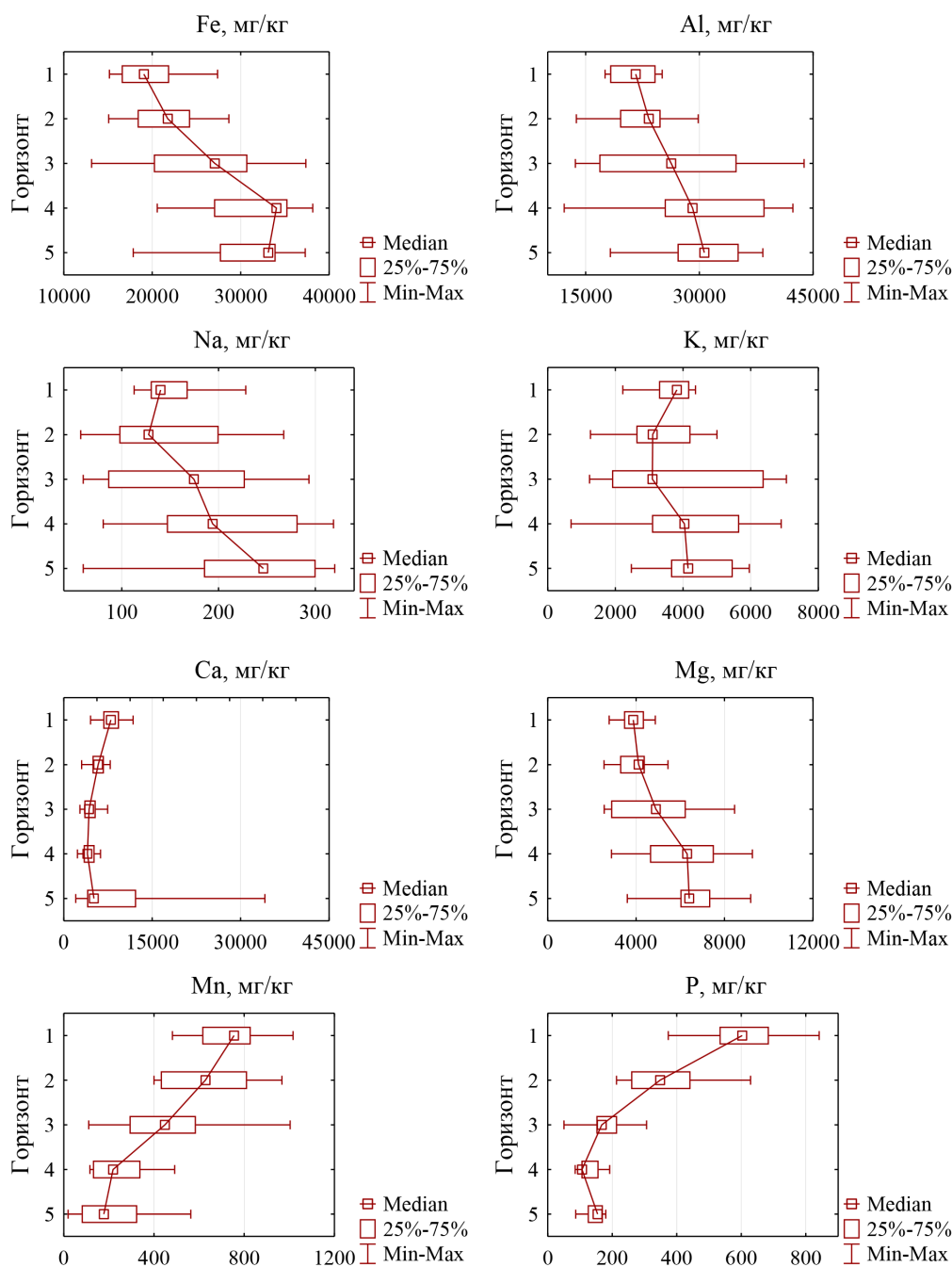


Рис. 2. Содержание макроэлементов в генетических горизонтах серых и темно-серых почв Зауралья (экстракция «царской водкой»).

Горизонты: 1 – грубогумусовый, 2 – серогумусовый (темногумусовый), 3 – серо(темно)гумусово-текстурный, 4 – текстурный, 5 – почвообразующая порода

Характер профильного распределения кальция и магния в исследованных серых и темно-серых почвах существенно различался, несмотря на их принадлежность к элементам среднего биологического накопления [15, с. 65]. Са демонстрировал черты биогенной аккумуляции с максимальными концентрациями в верхних органогенных горизонтах и последующим снижением вниз по профилю (медианы: 8001 → 5835 → 4303 → 4007 → 5111 мг/кг). Однако в почвообразующей породе двух разрезов (№ 6 и 8) зафиксировано резкое увеличение содержания Са до 34120 и 19080 мг/кг соответственно, что объясняется присутствием карбонатных образований, отмеченных при морфологическом описании в виде белых вкраплений диаметром 3–6 мм. В отличие от Са, распределение Mg имело выраженную аккумулятивную тенденцию с постепенным увеличением концентрации с глубиной (медианы: 3874 → 4117 → 4899 → 6312 → 6407 мг/кг), что свидетельствует о его активной миграции в иллювиальную часть профиля.

Установлены тесные положительные корреляции между содержанием органического вещества и концентрациями фосфора ($r = 0,81$) и марганца ($r = 0,73$) в почвенных горизонтах. Наибольшие концентрации этих элементов приурочены к верхним органогенным горизонтам, что количественно отражают медианные значения:

P: 603 → 348 → 168 → 106 → 155 мг/кг,
Mn: 755 → 628 → 448 → 218 → 178 мг/кг,
органическое вещество:
4,2 → 3,8 → 1,9 → 0,7 → 0,7 %.

Данное распределение является классическим примером биогенно-аккумулятивного процесса. Растения поглощают корнями рассеянные в почвенной толще Mn и P, концентрируя их в своей биомассе. Отмирая, растительные остатки возвращают эти элементы на поверхность почвы в виде концентрированного органического материала. Таким образом, растение, как своеобразный насос, перекачивает химические элементы из нижних горизонтов почвы в верхние.

Фосфор имеет особенно тесную связь с органическим веществом. Значительная часть P в верхних горизонтах представлена органическими формами (в составе гуминовых кислот, фитина и др.), которые отличаются малой подвижностью и не подвергаются активному вымыванию вниз по профилю.

Заключение

На основе проведенного исследования установлены закономерности распределе-

ния макроэлементов в серых и темно-серых почвах Зауралья:

Для железа и алюминия характерно четкое перераспределение по профилю с аккумуляцией в текстурном горизонте (содержание Fe возрастает до 157%, Al – до 125% относительно гумусового горизонта). Этот процесс, связанный с лессиважем, подтверждается корреляцией между содержанием глины и концентрациями Fe и Al.

Фосфор и марганец демонстрируют классическое биогенное накопление в верхних горизонтах, что подтверждается сильной корреляцией с органическим веществом.

Кальций и магний, имея сходные коэффициенты биологического поглощения, проявляют разную миграционную способность: Са аккумулируется в верхней части профиля, тогда как Mg мигрирует в нижние горизонты. Локальные максимумы Са в почвообразующей породе связаны с присутствием в ней карбонатов.

Калий характеризуется относительно равномерным распределением по профилю, что объясняется балансом между биогенной аккумуляцией и минералогическим запасанием в составе первичных и вторичных минералов.

Натрий демонстрирует признаки активного выщелачивания, соответствующего периодически промывному водному режиму исследованных почв.

Список литературы

1. Еремин Д.И., Каюгина С.М. Вариабельность свойств серых лесных почв Зауралья. Тюмень: НИИСХ СЗ – филиал ТюмНЦ СО РАН, 2024. 202 с. EDN: JXSMWC. ISBN 978-5-4266-0227-4.
2. Национальный атлас почв Российской Федерации / под общей ред. С.А. Шобы. М.: Астрель, 2011. 632 с. ISBN 978-5-271-37461-6.
3. Мамонтов В.Г. Химия почв: учебное пособие / 2-е изд., испр. и доп. М.: ИНФРА-М, 2025. 272 с. ISBN 978-5-16-019227-7.
4. Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 341 с. EDN: PTEEQE. ISBN 5-93520-044-9.
5. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. Тюменская область. [Электронный ресурс]. URL: <http://egrpr.soil.msu.ru/egrpr.php?show=RUREG&ValueID=1026> (дата обращения: 25.11.2025).
6. Каретин Л.Н. Почвы Тюменской области. Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1990. 286 с. ISBN 5-02-029556-6.
7. Каюгина С.М., Еремин Д.И. Физико-химические свойства серых лесных почв восточной окраины Зауральского плато // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Биология. 2022. Т. 15. № 4. С. 471–490. DOI: 10.17516/1997-1389-0399. EDN: YOCLPO.
8. Ренев Е.П., Еремин Д.И., Еремина Д.В. Оценка основных показателей плодородия почв наиболее пригодных для расширения пахотных угодий в Тюменской области // До-

стижения науки и техники АПК, 2017. Т. 31. № 4. С. 27–31. EDN: YOSHUB.

9. Котченко С.Г., Груздева Н.А., Еремин Д.И. Динамика химических свойств серой лесной почвы Северного Зауралья при интенсивном ее использовании в пашне // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2019. № 11 (181). С. 49–56. EDN: BRVIBM.

10. Каюгина С.М., Еремин Д.И. Гумусированность серых лесных почв Северного Зауралья в разрезе подтипов и разновидностей по гранулометрическому составу // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2023. № 5 (103). С. 15–19. DOI: 10.37670/2073-0853-2023-103-5-15-20. EDN: IUOXOI.

11. ГОСТ 26213-2021 Почвы. Методы определения органического вещества [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200180714> (дата обращения: 22.11.2025).

12. Земцова Е.С. Оценка уровня загрязнения почв и донных отложений тяжелыми металлами // Агрохимический вестник. 2023. № 4. С. 95–99. DOI: 10.24412/1029-2551-2023-4-016. EDN: SWPPYY.

13. Опекунова М.Г., Опекунов А.Ю., Кукушкин С.Ю., Ганул А.Г. Фоновое содержание химических элементов в почвах и донных осадках севера Западной Сибири // Почвоведение. 2019. № 4. С. 422–439. DOI: 10.1134/S0032180X19020114. EDN: ZADGVN.

14. Чернова О.В., Безуглова О.С. Опыт использования данных фоновых концентраций тяжелых металлов при региональном мониторинге загрязнения почв // Почвоведение. 2019. № 8. С. 1015–1026. DOI: 10.1134/S0032180X19080045. EDN: FOWRZK.

15. Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. М.: Астрель-2000, 1999. 610 с.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Работа выполнена в рамках темы ФНИ: «Эколого-геохимические преобразования почв экосистем Обь-Иртышского бассейна под воздействием природных и техногенных факторов» (Рег. № 1024023000029-9-1.5.4).

Financing: The work was carried out within the framework of the topic of fundamental scientific research: «Ecological and geochemical transformations of soils of ecosystems of the Ob-Irtysh basin under the influence of natural and man-made factors» (Reg. no. 1024023000029-9-1.5.4).

УДК 556.3(571.66)
DOI 10.17513/use.38463

КРЕМНИСТЫЕ ТЕРМАЛЬНЫЕ ВОДЫ КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЙ РЕКРЕАЦИОННЫЙ РЕСУРС КАМЧАТСКОГО КРАЯ

¹Рогатых С.В., ^{1,2}Гвозденко Т.А., ^{1,2}Антонюк М.В., ¹Штомпель К.В.

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга»,
Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация, e-mail: tagvozenko@mail.ru;

²Владивостокский филиал федерального государственного бюджетного научного учреждения
«Дальневосточный научный центр физиологии и патологии дыхания» –
Научно-исследовательский институт медицинской климатологии
и восстановительного лечения, Владивосток, Российская Федерация

Минеральные воды являются уникальными природными лечебными факторами и определяют лечебно-оздоровительный потенциал местности. Камчатский край имеет не только ландшафтную привлекательность, но и уникальные источники азотных кремнистых термальных вод. Месторождение Паратунка является одной из известных кремнистых терм региона. Целью исследования была оценка перспективности гидроминеральных ресурсов Паратунской курортной местности. Представлены результаты информационно-аналитического поиска, анализа фоновых материалов и исследования гидроминеральных ресурсов и Паратунской курортной местности Камчатского края. Проведенные исследования территории Паратунской зоны выявили разнообразие и уникальность химического состава термальных кремнистых вод, представленных тремя участками с различной температурой. Воды из источников Верхнего Паратунского бассейна мало изучены. Химический профиль вод соответствует хлоридно-сульфатным водам с преобладанием кальция и натрия, содержащим умеренное количество кремния. Вода из Средне-Паратунских источников отличается низкой минерализацией и сульфатно-кальциево-натриевым составом с высоким уровнем кремния, а также содержит повышенные концентрации фтора и мышьяка. Эти термальные воды классифицируются как кремнистые, принадлежащие к горячинскому типу, и требуют дальнейшего научного изучения. Наиболее изучены термальные воды Нижне-Паратунского участка. Вода хлоридно-сульфатная натриево-кальциевая кремнистая угличского типа, обладает бальнеологическими компонентами: фтор, мышьяк, литий, бор. Термальные воды месторождения Паратунка широко используются с лечебной целью в открытых бассейнах санаториев, многочисленных баз отдыха. Дальнейшее изучение различных по составу кремнистых термальных вод месторождения Паратунка, разработка специальных медицинских заключений, исследования их использования в комплексе с морскими гидробионтами определяет перспективность рекреационного потенциала курортной территории Камчатки.

Ключевые слова: гидроминеральные ресурсы, термальные источники, курортная территория, Камчатка

SILICEOUS THERMAL WATERS AS A PROMISING RECREATIONAL RESOURCE IN THE KAMCHATKA TERRITORY

¹Rogatykh S.V., ^{1,2}Gvozenko T.A., ^{1,2}Antonyuk M.V., ¹Shtompel K.V.

¹Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
“Kamchatka State University named after Vitus Bering”, Petropavlovsk-Kamchatsky,
Russian Federation, e-mail: tagvozenko@mail.ru;

²The Vladivostok Branch of the Federal State Budgetary Scientific Institution
“Far Eastern Scientific Center of Physiology and Pathology of Respiration” – Scientific Research
Institute of Medical Climatology and Rehabilitation Treatment, Vladivostok, Russian Federation

Mineral waters are unique natural healing factors and determine the therapeutic and recreational potential of the area. The Kamchatka Territory has not only beautiful landscapes, but also unique sources of nitrogenous siliceous thermal waters. The Paratunka deposit is one of the well-known siliceous thermal springs in the region. The purpose of this study was to assess the potential of the hydro-mineral resources in the Paratunka resort area. The results of information and analytical research, analysis of background materials, and research on the hydro-mineral resources and the Paratunka resort area in the Kamchatka Territory are presented. The conducted studies of the Paratunka zone revealed the diversity and uniqueness of the chemical composition of the thermal siliceous waters, which are represented by three areas with different temperatures. The waters from the springs of the Upper Paratunka basin are poorly studied. The chemical profile of the water corresponds to chloride-sulfate waters with a predominance of calcium and sodium, containing a moderate amount of silicon. The thermal water of the Sredne-Paratunka springs is slightly mineralized, sulfate calcium-sodium siliceous water with a high content of fluorine and arsenic acid. According to their chemical composition, they belong to the Goryachinsky type of siliceous thermal waters and require further research. The thermal waters of the Nizhne-Paratunka section are the most studied. The water is chloride-sulfate sodium-calcium siliceous of the Uglich type, and it contains balneological components such as fluorine, arsenic, lithium, and boron. The thermal waters of the Paratunka deposit are widely used for therapeutic purposes in the outdoor pools of sanatoriums and numerous recreation centers. Further study of the Paratunka deposit's various siliceous thermal waters, development of special medical reports, and research on their use in combination with marine hydrobionts determine the prospects for the recreational potential of Kamchatka's resort area.

Keywords: hydro-mineral resources, thermal springs, resort area, Kamchatka

Введение

Эффективное использование природных источников для укрепления и восстановления здоровья занимает ключевое место в стратегиях использования природных богатств и курортной медицины. Санатории и курорты, обладающие богатым историческим наследием и обширным опытом в применении как естественных, так и созданных руками человека лечебных факторов для излечения различных недугов, представляют собой мощный инструмент для достижения цели увеличения продолжительности здоровой, активной и полноценной жизни [1; 2].

Ключевым элементом, который формирует потенциал отдыха и восстановления на данной местности, служат ее рекреационные активы. Среди них особое место занимают природные ресурсы: благоприятный климат, минеральные воды, ландшафты и разнообразие природных пейзажей. Лечебные и оздоровительные возможности региона, обусловленные сочетанием лечебных свойств минеральных вод и уникальных био-климатических характеристик, играют решающую роль в привлекательности территории для развития и использования [3]. Дальний Восток отличается богатством уникальных природных факторов, включая климат, минеральные источники, лечебные грязи, морскую флору и фауну, а также разнообразие растительности. На сегодняшний день наблюдается устойчивый интерес к терапевтическим и оздоровительным качествам природных ресурсов Камчатского края [4; 5].

Камчатский край – это отдаленный регион России с непростыми климатическими условиями, но имеющий невероятно привлекательный ландшафт и уникальные гидроминеральные ресурсы. Одним из богатств региона являются месторождения природных термальных минеральных вод различного химического состава и температуры [6, с. 36–39; 7, с. 94–106]. С конца прошлого столетия проведен обширный ряд научно-исследовательских работ, посвященных различным аспектам изучения природных лечебных и оздоровительных ресурсов территории Камчатского края [8–10]. Несмотря на длительный период исследования рекреационных ресурсов региона, сохраняются открытые вопросы их перспективного освоения и применения [11; 12; 13; с. 5–8]. Самыми распространенными и разнообразными по составу природными ресурсами на Камчатке являются кремнистые термальные воды, имеющие высокую бальнеологическую ценность [14; 15].

Цель исследования – оценить перспективность гидроминеральных ресурсов Паратунской курортной местности Камчатского края.

Материалы и методы исследования

Для решения поставленных задач проведена оценка состояния и степени изученности гидроминеральных ресурсов полуострова Камчатка с позиции их бальнеотерапевтического применения. Проведен информационно-аналитический поиск за период с 2000 по 2024 г. с использованием литературных источников базы данных PubMed, научной электронной библиотеки eLibrary.ru; фондовых материалов по минеральным водам Камчатки. Анализировались бальнеологические заключения, выполненные за период с 2007 по 2023 г. Владивостокским филиалом ДНЦ ФПД – НИИ медицинской климатологии и восстановительного лечения [7, с. 92–97; 16]. Использованы информационно-аналитические сведения о геотермальном потенциале месторождений Камчатского края, подготовленные на основе данных Департамента по недропользованию Дальневосточного федерального округа.

Результаты исследования и их обсуждение

Паратунка – самое известное месторождение кремнистых терм, пользующееся популярностью у жителей и гостей Камчатки. Исследовательские проекты, направленные на анализ лечебных и туристических потенциалов Паратунской зоны, охватили территорию в 23,4 тыс. га. Экспедиционные исследования по изучению бальнеологических свойств минеральных вод проводились по пяти маршрутам, один из которых проходил вдоль долины р. Паратунки с севера на юг, остальные имели поперечные направления, включая Верхне-, Средне- и Нижне-Паратунские выходы минеральных вод и туристический траверс от ручья Тополового к сопке Бархатной [3].

Основной лечебный и оздоровительный актив Паратунского курортного района представлен азотно-кремнистыми горячими водами, простирающимися вдоль течения р. Паратунка. Эти воды, в соответствии с местом их выхода на поверхность, химическим составом, уровнем минерализации, температурными показателями и прочими характеристиками, классифицируются на источники Нижнего, Среднего и Верхнего Паратунка (таблица).

Химический состав минеральных вод месторождения Паратунка Камчатского края

| Показатели | Верхне-Паратунские источники | | | | Средне-Паратунские источники | Нижне-Паратунские источники | | |
|--|------------------------------|-------------|-------------|-------------|------------------------------|-----------------------------|-------------|---------------|
| | Э-1 ГК-44 | Э-2 | ГК-36 | ГК-36 | | ГК-9 | ГК-13 | РЭ-7 |
| Скважина | 2019 | 2023 | 2023 | 2023 | Скв. 51 | 2010, 2023 | 2023 | 2018 |
| Бальнеозаключение, год | 76,5 | до 90 | 82 | 82 | 74 | 80 | 82 | 78 |
| Т | 0,94–1,08 | 0,842–1,124 | 1,4–1,5 | 1,4–1,5 | 0,7–0,8 | 2,10–2,17 | 1,9–2,0 | 1,99–2,106 |
| М, г/дм ³ | 6,3–8,8 | 6,2–8,5 | 6,9–8,6 | 6,9–8,6 | 9,23 | 8,9 | 7,56–8,45 | 6,02–8,38 |
| рН | 9,36–39,72 | 24,2 | 17,6–28,3 | 17,6–28,3 | 1,28 | 14,74–22,24 | 31,5–35,2 | 35,55–80,34 |
| Гидрокарбонат-ион, НСО ₃ ⁻ , мг/дм ³ | 111,7–142,1 | 99,3–130,7 | 62,0–66,1 | 62,0–66,1 | 27,41 | 236,3–254,4 | 308,0–314,7 | 427,3–470,9 |
| Хлорид-ион, Cl, мг/дм ³ | 400–500 | 504,1–519,3 | 833,7–836,2 | 833,7–836,2 | 427,1 | 1112,0–1122,0 | 865–883,5 | 762–802,8 |
| Сульфат-ион, SO ₄ ²⁻ , мг/дм ³ | 18,2–279,0 | 222,0–276,5 | 208,4–214,9 | 208,4–214,9 | 170,3 | 309,41–335,41 | 362–413,9 | 439,92–487,15 |
| Натрий + калий, Na ⁺ +K ⁺ | 0,1–1,76 | 0,1–0,58 | 0,1–1,6 | 0,1–1,6 | 1,09 | 0,94–1,61 | 0,18–0,52 | 0,48–5,5 |
| Магний, Mg ²⁺ | 8,8–64,2 | | 171,7–200 | 171,7–200 | 57,5 | 311,8–335,8 | 205–226 | 186–197 |
| Кальций, Ca ²⁺ | 80–96 | 62–142 | 53–161 | 53–161 | 73,6 | 57–61 | 84–190 | 113–156,8 |
| Метакремниевая кислота, H ₂ SiO ₃ , мг/дм ³ | 2,28–3,64 | 2,7–3,51 | 0,12 | 0,12 | 1,7 | 1,86 | 1,67–2,2 | 1,22–2,19 |
| Фтор, F, мг/дм ³ | < 0,05 | | <0,1 | <0,1 | <0,16 | <0,05 | | <0,05 |
| Железо, Fe ²⁺³⁺ , мг/дм ³ | 0,643–0,699 | 0,0–0,18 | | | 0,45 | 0,11 | | 0,074–0,083 |
| Мышьяк, As, мг/дм ³ | 30,82–31,51 | 27,6–33,8 | 18,3 | 18,3 | 12,1 | | 10,14–10,30 | 10,05 |
| Ортоборная кислота, H ₃ BO ₃ , мг/дм ³ | < 0,1 | | | | 0,70 | 0,70 | | 0,70 |
| Бром, Br, мг/дм ³ | < 0,03–0,5 | | | | | < 0,03 | | < 0,5 |
| Йод, I, мг/дм ³ | | | | | | 1,069 | – | – |
| Бор, B, мг/дм ³ | | | | | | | | |
| Тип воды | Горячинский | | | | Горячинский | Углинский | | |

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Источники Верхней Паратунки располагаются в горной части долины одноименной реки, где склон горы Горячей образует заметный изгиб на высоте от 70 до 80 м. Здесь насчитывается свыше 16 горячих ключей (температура воды до $+90^{\circ}\text{C}$), которые формируют три ручья, текущих параллельно, и создают живописный теплый водопад [3]. Согласно результатам бальнеологических заключений, химический состав воды характеризуется как хлоридно-сульфатный кальциево-натриевый с умеренным содержанием кремния (до 45 мг/л), минерализация достигает примерно 1 г/л, а уровень мышьяка составляет около 0,3 мг/л [7, с. 97]. Верхне-Паратунские источники активно используются для туристических экскурсий и жителями региона в качестве места семейного отдыха на природе.

Необычными характеристиками обладают термальные воды среднего Паратунского участка, находящегося в центральной части месторождения. Как представлено в таблице, этот термальный источник температурой $+74^{\circ}\text{C}$ характеризуется низкой минерализацией, высокой щелочной реакцией среды, сульфатно-кальциево-натриевым составом, высоким содержанием кремния, фтора, мышьяка и классифицируется как кремнистые термальные воды горячинского типа (таблица). В санаторно-курортной практике минеральные воды такого состава могут использоваться для лечения заболеваний сердечно-сосудистой, нервной, костно-мышечной, систем, обменных нарушений, заболеваний женских половых органов и кожи [7, с. 93].

Как свидетельствуют результаты проведенных экспедиционных исследований, термальные воды Нижнего участка месторождения Паратунка (до $+80^{\circ}\text{C}$) добываются из-под земли на отметке в 320 м, находятся на территории одноименного населенного пункта, пользуются широкой популярностью и активно применяются в санаторно-курортных учреждениях, домах отдыха и туристических комплексах [3]. По химическому составу воды Нижне-Паратунских источников слабоминерализованные, хлоридно-сульфатные натриево-кальциевые, кремнистые [7, с. 92]. Характерными особенностями данных вод Паратунского месторождения является не только высокая температура, но и наличие таких бальнеологических компонентов, как фтор, мышьяк, литий, бор, позволяющих отнести ее к водам угличского типа (таблица).

Многообразие термальных слабоминерализованных хлоридно-сульфатных, кальцие-

во-натриевых, кремнистых вод месторождения Паратунка широко используется на Камчатке в разнотемпературных бассейнах Военного санатория «Паратунка», санаториях «Жемчужина Камчатки», «Светлячок», для наружного использования в виде ванн, в целях лечения и профилактики различных заболеваний системы кровообращения, нервной системы, костно-мышечной системы, нарушений обмена, патологии женских половых органов, кожных заболеваний.

Для дальнейшего применения уникальных кремнистых термальных вод месторождения Паратунка необходимо проведение комплексных мероприятий по разработке специальных медицинских заключений, оценке запасов и их обязательной государственной экспертизе, рациональной эксплуатации для целей бальнеологии и промышленной добычи в качестве лечебных. При этом важно отметить, что биоклимат Паратунской зоны обладает высокими рекреационными качествами, подходящими для санаторно-курортной деятельности, достигая отметки в 57%. Этот показатель свидетельствует о значительных возможностях для развития данного региона в этой сфере.

Помимо этого, водные просторы Камчатки изобилуют разнообразием морской флоры и фауны, включая водоросли, трепангов, крабов, гребешков и морских ежей. Эти организмы служат основным источником ценных биоактивных веществ, таких как альгинаты, каррагинаны, фукоиданы, омега-3 жирные кислоты и пектины. Прикамчатские воды характеризуются высоким разнообразием бурых водорослей, в том числе ламинариевых и фукуса двураздельного, но медико-биологических исследований камчатского водорослевого сырья не проводилось. При этом в настоящее время исследователи проявляют особый интерес к биоактивным компонентам, обладающим мембранотропными, антиоксидантными или адсорбционными свойствами, которые извлекаются из морских продуктов. В этом ключе комплексное использование природных минеральных вод и гидробионтов может являться основой для разработки новых форм активных соединений с целью разработки медицинских препаратов направленного действия.

Заключение

Обширные запасы азотистых кремнистых горячих вод становятся ключевым элементом лечебно-оздоровительного потенци-

ала Паратунской курортной зоны на Камчатке, открывая широкие перспективы для развития. Изучение комплексного применения гидроминеральных ресурсов, гидробионтов Камчатки, с точки зрения лечебно-профилактического применения, особенно перспективно для создания новых препаратов. Интегрированный подход к применению уникальных природных лечебных ресурсов, а также создание медицинских инноваций, способных нейтрализовать негативное влияние климатических особенностей курорта, способствует не только улучшению качества здравоохранения в зоне отдыха Паратунки, но и открывает широкие возможности для развития туристического потенциала данной местности.

Список литературы

1. Адилов В.П., Львова Н.В., Морозова Е.Ю., Ряженев В.В. Азотные слабоминерализованные термальные минеральные воды России // Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физкультуры. 2019. Т. 96 (5). С. 66–71. DOI: 10.17116/kurort20199605166. EDN: NTFPHX.
2. Рафиков А.М., Тимофеева Л.С. Природно-рекреационный потенциал Камчатки // Казанский вестник молодых ученых. 2023. Т. 7. № 1. С. 80–93. URL: <https://scinetwork.ru/articles/6364> (дата обращения: 08.12.2025). EDN: UTKWQI.
3. Веремчук Л.В., Челнокова Б.И., Гвозденко Т.А., Лемешко Т.В. Рекреационные ресурсы Паратунской зоны Камчатской области // Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физкультуры. 2012. № 5. С. 64–67. URL: <https://elibrary.ru/pugvnj> (дата обращения: 29.11.2025). EDN: PUGVNJ.
4. Леонова Н.Б., Микляева И.М., Рябова Н.В., Малхазова С.М. Современное состояние и перспективы использования целебных ресурсов Камчатки // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2018. № 6. С. 10–17. URL: <https://vestnik5.geogr.msu.ru/jour/article/view/477/431> (дата обращения: 11.11.2025). EDN: YVUJML.
5. Погорелов А.Р. Перспективы развития Паратунской курортной зоны (Камчатский край) // Вестник физиотерапии и курортологии. 2019. Т. 25. № 4. С. 122–125. URL: <https://elibrary.ru/txvaqd> (дата обращения: 22.11.2025). EDN: TXVAQD.
6. Мурадов С.В., Кириченко В.Е., Рогатых С.В. Термоминеральные источники и лечебные грязи Камчатского края. Петропавловск-Камчатский: РИОиП ККТ, 2013. 238 с. ISBN 978-594205-048-0.
7. Минеральные воды и лечебные грязи Дальнего Востока: справочник / сост. Б.И. Челнокова, Т.А. Гвозденко, А.А. Павлов. 4-е изд., доп. Владивосток: Изд-во Дальневосточного университета, 2022. 335 с. ISBN 978-5-7444-5428-9.
8. Погорелов А.Р. Потребность населения Камчатского края в развитии Паратунской курортной зоны // Вестник физиотерапии и курортологии. 2018. Т. 24. № 3. С. 159–162. URL: <https://elibrary.ru/yoebjj> (дата обращения: 04.11.2025). EDN: YOEBJJ.
9. Рогатых С.В., Мурадов С.В. Критерии обозначения и оценка термоминеральных вод Камчатки // Успехи современного естествознания. 2018. № 4. С. 150–154. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=36740> (дата обращения: 24.11.2025). DOI: 10.17513/use.36740. EDN: XPNBGP.
10. Мурадов С.В., Пахомова Н.А., Рогатых С.В. Минеральные источники и пелоиды Южной Камчатки как основа выделения специализированных лечебных зон. // Естественные и технические науки. 2008. № 1. С. 169–175. URL: <https://elibrary.ru/jtyosf> (дата обращения: 23.11.2025). EDN: JTYOSF.
11. Мурадов С.В. Влияние термоминеральных вод Паратунского гидротермального месторождения на экологическое состояние иловой сульфидной лечебной грязи // Успехи современного естествознания. 2018. № 6. С. 107–112. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=36790> (дата обращения: 24.11.2025). DOI: 10.17513/use.36790.
12. Локарев А.В., Степанова Э.Ф., Огай М.А., Ковтун Е.В., Морозов Ю.А., Макиева М.С., Нам Н.Л. Возможность использования термальной воды Нижне-Паратунских источников Камчатки для создания лекарственных композиций фармацевтического и космецевтического назначения // Фармацевтическое дело и технология лекарств. 2020. № 1. С. 67–78. URL: <https://panor.ru/articles/32779.html#> (дата обращения: 26.11.2025). DOI: 10.33920/med-13-2001-07. EDN: SOZDTU.
13. Левенчук А., Левенчук В. Вода минеральная Камчатская и современная Тихоокеанская морская фармация. Интеллектуальная издательская система Ridero, 2023. 96 с. ISBN 978-5-0059-5374-2.
14. Ткаченко А.В., Слинькова Т.А., Шипкова Л.Н., Харлашкина П.С. Кремниевые термальные воды и их влияние на здоровье человека // Пульс. 2021. Т. 23 (2). С. 96–102. DOI: 10.26787/nydha-2686-6838-2021-23-2-96-102. EDN: QBQOSI.
15. Рахманин Ю.А., Егорова Н.А., Михайлова Р.И., Рыжова И.Н., Кочеткова М.Г., Степанов А.А. Лечебное и профилактическое применение минеральных вод, содержащих кремний, в Российской Федерации (обзор). Ч. 4. Дальневосточный и Сибирский федеральные округа // Микроэлементы в медицине. 2024. Т. 25 (1). С. 16–23. URL: <https://journal.microelements.ru/uploads/after-02-Rakhmanin-Egorova-et-al-4-16-23-661520fe4b274.pdf?v1> (дата обращения: 23.11.2025). DOI: 10.19112/2413-6174-2024-25-1-16-23. EDN: UFKUNE.
16. Челнокова Б.И. Использование термальных вод Приморского, Хабаровского и Камчатского краев, Еврейской автономной области в санаторно-курортном лечении // Здоровье. Медицинская экология. Наука. 2017. № 4. С. 74–80. URL: <https://elibrary.ru/zvzywr> (дата обращения: 01.12.2025). EDN: ZVZYWR.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Исследование выполнено в рамках Межведомственной программы комплексных научных исследований Камчатского полуострова и сопредельных акваторий, реализуемой ФГБОУ ВО «КамГУ им. Витуса Беринга».

Financing: The study was carried out within the framework of the Interdepartmental Program of Comprehensive Scientific Research of the Kamchatka Peninsula and adjacent water areas, implemented by the KamSU Federal State Budgetary Educational Institution. Vitus Bering”.

СТАТЬЯ

УДК 551.34:691.223:544.015.4
DOI 10.17513/use.38464

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ УДЕЛЬНОЙ
ТЕПЛОЕМКОСТИ КРУПНОДИСПЕРСНОГО ГРУНТА
В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВЛАЖНОСТИ**

**Таппырова Н.И. ORCID ID 0000-0003-4979-7703,
Кравцова О.Н. ORCID ID 0000-0001-9345-421X,
Малышев А.В. ORCID ID 0000-0001-7558-0642,
Протодяконова Н.А. ORCID ID 0000-0001-5948-579X,
Тимофеев А.М. ORCID ID 0000-0001-6021-5423,
Степанов А.В. ORCID ID 0000-0001-9331-5885**

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»,
Институт физико-технических проблем Севера имени В.П. Ларионова Сибирского отделения Российской академии наук, Якутск, Российская Федерация, e-mail: o.n.kravtsova@iptpn.ysn.ru*

В связи с интенсивным освоением Арктической зоны Российской Федерации при строительстве гражданских и промышленных объектов становится актуальной задача изучения многолетнемерзлых и промерзающих – протаивающих грунтов. С появлением высокоточных приборов и разработкой новых методик появилась возможность уточнения теплофизических характеристик грунтов в широком диапазоне изменения температуры и влажности. Целью данной работы является экспериментальное исследование эффективной удельной теплоемкости в процессе промерзания – протаивания. В качестве исследуемого материала был взят песок мелкий с различной влажностью. Эффективная удельная теплоемкость определена калориметрическим методом, а температура начала замерзания и переохлаждения – криоскопическим методом. Получены значения эффективной удельной теплоемкости в зависимости от температуры и влажности, определены точки начала замерзания, конца оттаивания и температура переохлаждения. Полученные результаты показывают, что при фазовых переходах вода – лед и лед – вода появляются пики значений эффективной удельной теплоемкости. Влажность грунта влияет на максимальное значение этих пиков как при замерзании, так и при оттаивании. Из полученных термограмм видно, что длительность фазового перехода и температура переохлаждения также зависят от влажности грунта.

Ключевые слова: мерзлые грунты, талые грунты, песчаный грунт, эффективная удельная теплоемкость, фазовые переходы, влажность

Благодарности: Работа выполнена с использованием научного оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

**THE RESEARCH ON THE EFFECTIVE SPECIFIC HEAT CAPACITY
OF COARSE-GRAINED SOIL DEPENDING ON MOISTURE CONTENT**

**Tappyrova N.I. ORCID ID 0000-0003-4979-7703,
Kravtsova O.N. ORCID ID 0000-0001-9345-421X,
Malyshev A.V. ORCID ID 0000-0001-7558-0642,
Protodyakonova N.A. ORCID ID 0000-0001-5948-579X,
Timofeev A.M. ORCID ID 0000-0001-6021-5423,
Stepanov A.V. ORCID ID 0000-0001-9331-5885**

Federal State Budgetary Institution of Sciences “Yakutsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”, Institute of Physical-Technical Problems of the North named after V.P. Larionov of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation, e-mail: o.n.kravtsova@iptpn.ysn.ru

Due to the intensive development of the Arctic zone of the Russian Federation, the study of permafrost and freeze-thaw soils has become a relevant task during the construction of civil and industrial facilities. The advent of high-precision instruments and the development of new methods have made it possible to refine the thermophysical properties of soils over a wide range of temperature and moisture content. The goal of this study is to experimentally investigate the effective specific heat capacity at different moisture content levels during the freeze-thaw process. Fine-grain sand with varying moisture contents was used as the test material. The effective specific heat capacity was determined calorimetrically, while the freezing onset and supercooling temperatures were cryoscopically determined. The dependences of the effective specific heat capacity on temperature and moisture content were obtained. The freezing onset, thaw end points, and supercooling temperature were determined. The obtained results allow us to conclude that peak values of the effective specific heat capacity are recorded during the water-ice and ice-

water phase transitions. Soil moisture affects the magnitude of these peaks: the higher the soil moisture, the greater the peak values of the effective specific heat capacity during both freezing and thawing. The resulting thermograms show that the duration of the phase transition also depends on the moisture content of the soil.

Keywords: frozen soils, thawed soils, sandy soils, effective specific heat capacity, phase transitions, moisture content

Acknowledgement: *This work was performed using the scientific equipment of the Shared Use Center of the Yakut Scientific Center, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.*

Введение

Освоение арктических районов – строительство промышленных и гражданских объектов, дорог, нефте- и газопроводов, бурение скважин невозможно без изучения многолетнемерзлых и промерзающих – протаивающих грунтов. В настоящее время отсутствуют четкие рекомендации по выполнению тепловых расчетов при замерзании – оттаивании грунтов с учетом фазовых переходов воды [1; 2, с. 3–5]. Для решения этих задач необходимы в первую очередь теплофизические характеристики грунтов (теплопроводность, температуропроводность, удельная теплоемкость). Их значения меняются в зависимости от вида грунта, содержания влаги, засоленности и различных мерзлотных условий. В данное время имеется достаточно большой массив экспериментальных данных по теплопроводности и температуропроводности мерзлых и талых грунтов. Так, в работе [3, с. 32–107] представлены результаты экспериментальных и расчетных методов определения теплофизических свойств мерзлых и талых горных пород Северо-Востока России. А.В. Степанов, А.М. Тимофеев разработали метод определения теплофизических свойств влажных дисперсных материалов [4, с. 5–26]. В работе [5] приведен обзор лабораторных методов определения теплофизических характеристик мерзлых и талых грунтов.

Ранее авторами были проведены исследования теплопроводности мелкодисперсных и крупнодисперсных грунтов, в том числе с крупнообломочными включениями, в талом и мерзлом состояниях. На основании этих исследований была разработана методика расчета теплопроводности с учетом количества незамерзшей воды и засоленности [6; 7].

Удельная теплоемкость также является важной характеристикой теплового состояния грунтов. Эта характеристика становится эффективной величиной, когда присутствует фазовый переход [3, с. 10]. В последнее время с появлением высокоточных приборов и усовершенствованием методик исследования [8] появилась возможность

уточнения изменения этой характеристики в широком диапазоне температур, влажности и других параметров. Ранее авторами были получены экспериментальные данные по удельной теплоемкости грунта при положительных температурах [9].

Цель исследования – экспериментальное изучение влияния влажности на удельную теплоемкость, используемую при численном моделировании тепловых процессов. Для сравнения и достоверности полученных результатов были определены температуры переохлаждения, замерзания и оттаивания.

Материалы и методы исследования

Для исследования влияния влажности на эффективную удельную теплоемкость был выбран грунт, а именно речной песок из карьера в окрестностях г. Якутска.

Для исключения влияния солей песок предварительно отмывался и определялся гранулометрический состав и основные водно-физические характеристики согласно ГОСТ 25100-2020 (таблица) [10].

Модуль крупности определялся согласно ГОСТ 32727-2014 [11] и равен 1,64, степень неоднородности $C_u = 1,44 < 3$. Таким образом, исследуемый материал относится к мелкому, однородному, незасоленному песку без органики.

Для получения определенной влажности предварительно высушенный песок искусственно увлажнялся дистиллированной водой. Для проведения эксперимента подготавливались образцы с тремя значениями влажности W : 10, 15, 20%.

Эффективная удельная теплоемкость определялась калориметрическим методом [12] на дифференциально-сканирующем калориметре Setaram Sensys Evo TG-DSC (рис. 1). Он имеет две измерительные ячейки: одна предназначена для исследуемого образца, в другую, ячейку сравнения, помещается пустой тигель. Экспериментально измеряется временная зависимость разницы температур между ячейкой с образцом и ячейкой сравнения. Для этого ячейки конструированы максимально симметрично (одинаковые тигели, сенсоры, расстояние от нагревателя).

Физические характеристики грунта

| Содержание частиц, % | | | | | | | | | | Гигроскопическая влажность, % | Плотность частиц грунта, г/см ³ | Наименование грунта по ГОСТ 25100-2020 |
|----------------------|----------------|------------------|-------------------|-------------------|--------------------|-------------------|-----------------------|-------------------|-----------------|-------------------------------|--|--|
| свыше 10 мм | 10–5 мм | 5–2,5 мм | 2,5–1,25 мм | 1,25–0,63 мм | 0,63–0,315 мм | 0,315–0,16 мм | меньше 0,16 мм | 0,16–0,056 мм | меньше 0,056 мм | | | |
| A ₁₀ | A ₅ | A _{2,5} | A _{1,25} | A _{0,63} | A _{0,315} | A _{0,16} | A _{<0,16} | A _{0,05} | A ₀ | W _g | ρ _s | |
| 0,0 | 0,0 | 0,104 | 0,06 | 0,62 | 65,0 | 31,1 | 3,116 | – | – | 0,1 | 2,64 | Песок мелкий, однородный, незасоленный, без органики |

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.



Рис. 1. Дифференциально-сканирующий калориметр Setaram Sensys Evo TG-DSC
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Тигели изготовлены из алюминия емкостью 120 мкл и средним весом 0,2228 г. Этот калориметр имеет 3Д-датчик типа Кальве, который состоит из 120 термодатчиков, который полностью окружает зону измерения. 3Д-датчик обладает высокой чувствительностью измерения, поэтому измерения на этом калориметре имеют высокую точность. Погрешность определения примерно 1 %. Измерения при отрицательных температурах проводились с использованием жидкого азота.

Тигель заполнялся исследуемым песком с определенной влажностью и помещался в ячейку калориметра. Эксперимент проводился по предварительно заданному режиму (рис. 2). Путем экспериментального подбора была выбрана оптимальная скорость замораживания – оттаивания, которая составляет 0,7 К/мин.

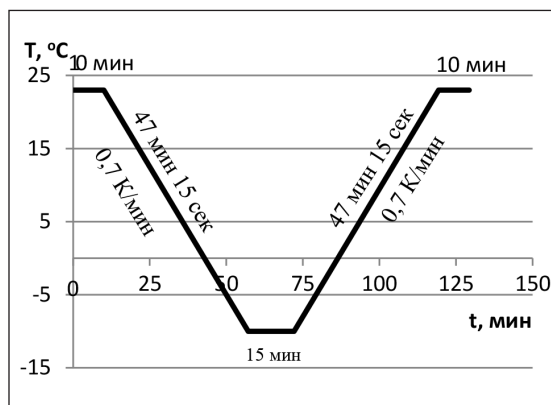


Рис. 2. Температурный режим проведения эксперимента

Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Образец песка выдерживался 10 мин при +23 °С для того, чтобы принять температуру ячейки. Затем охлаждался примерно 47 мин от +23 до -10 °С (0,7 К/мин), далее образец выдерживался при -10 °С в течение 15 мин, после этого нагревался в течение 47 мин от -10 до +23 °С и далее выдерживался при температуре +23 °С в течение 10 мин. Весь эксперимент длится 129 мин 15 с.

Эффективная удельная теплоемкость определялась сравнением результатов двух измерений:

- 1) с двумя пустыми тигелями;
- 2) с одним пустым тигелем и с тигелем, заполненным образцом исследуемого материала.

Кроме определения эффективной удельной теплоемкости также определялась точка начала замораживания и конца оттаивания образцов грунта (рис. 4, 6, 8). Методика определения основана на явлении выделе-

ния скрытой теплоты фазового перехода вода – лед при промерзании и при оттаивании грунта лед – вода [13]. Регистрация данных проводится с помощью преобразователя сигналов «Теркон» производства ООО «ТЕРМЭКС» (г. Томск) с возможностью записи показаний во времени. Измерения проводили на образцах песка нарушенного сложения. Для удержания определенного объема сыпучего материала применяли контейнеры, сделанные из ПВХ в форме цилиндра с совмещенной полусферой в основании.

Перед проведением опыта образец доставался из эксикатора и закладывался в контейнер. После чего накрывался сверху крышкой с размещенной по центру термопарой. Термопара размещалась внутри образца в средней области. Подготовленные образцы в контейнерах устанавливались в полиэтиленовый ящик с наполненным сухим песком. Ящик с песком на момент установки образцов выставляется в холодильной камере при заданной отрицательной температуре. Оттаивание производилось в таком же ящике с песком при комнатной температуре.

Для определения температуры начала замерзания по результатам испытания образца грунта строят термограмму замерзания – график изменения температуры в образце во времени при замерзании. Аналогично для определения температуры конца оттаивания строится по замеренным данным – график изменения температуры в образце во времени при оттаивании. Обработка данных проводится согласно ГОСТ Р 71043-2023 [14].

Результаты исследования и их обсуждение

Эффективная удельная теплоемкость рассчитывалась с помощью программного обеспечения, входящего в состав ДСК, исходя из

замеренного теплового потока в каждой временной, температурной и влажностной точке.

На рис. 3–8 приведены результаты исследования. Из рис. 3, 5, 7 видно, что охлаждение грунта можно разделить на три зоны:

1. Талая зона: от температуры $+23^{\circ}\text{C}$ до начала фазового перехода. В этой зоне значения удельной теплоемкости практически не меняются, так как при положительных температурах удельная теплоемкость незасоленных, талых грунтов не зависит от температуры.

2. Зона фазового перехода. Она также захватывает переохлаждение. В этой зоне зафиксирован резкий скачок (пик) значений эффективной удельной теплоемкости, который характеризует фазовый переход вода – лед. Подобные результаты, полученные расчетным способом, приведены в работе [15]. Правая ветвь пика имеет более резкий подъем, чем левая ветвь. При понижении температуры после пика значения эффективной удельной теплоемкости начинают уменьшаться. Высота пиков значений удельной теплоемкости зависит от влажности грунта, чем больше влажность, тем больше значения (47, 65, 101 Дж/(г·К)).

3. Мерзлая зона. Эта зона соответствует полному замерзанию свободной воды. При этом значения эффективной удельной теплоемкости уменьшаются и становятся независимыми от температуры.

При оттаивании грунта наблюдаются такие же три зоны. Отличие составляет только фазовый переход лед – вода (пик), который наблюдается около 0°C . При оттаивании зона фазового перехода смещается в зону положительных температур. Максимальное значение удельной теплоемкости при оттаивании в несколько раз меньше, чем при замерзании. Форма пика при оттаивании более широкая, чем при замерзании.

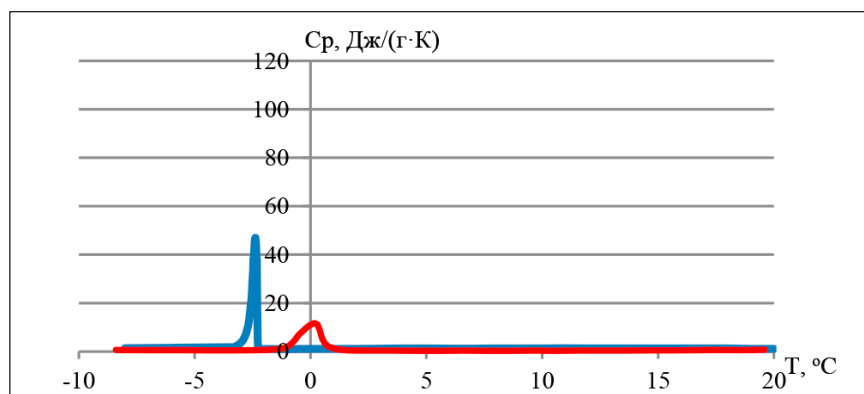


Рис. 3. Зависимость эффективной удельной теплоемкости песка от температуры. $W = 10\%$.

Синяя линия – замерзание, красная линия – оттаивание

Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

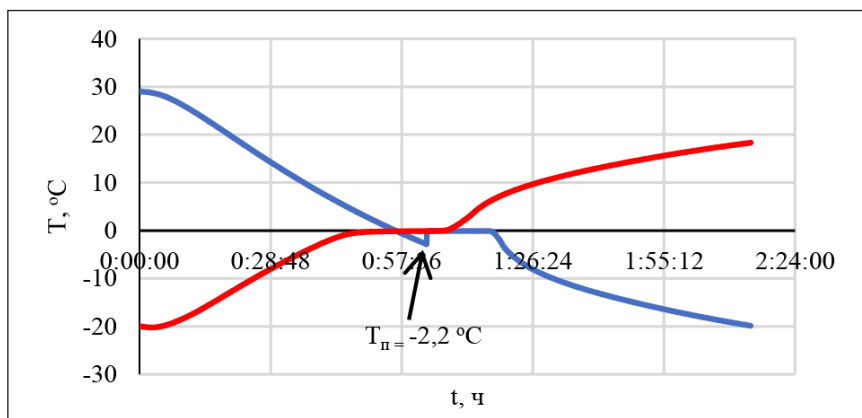


Рис. 4. Термограмма заморзания – оттаивания песка с влажностью $W = 10\%$.
Синяя линия – заморзание, красная линия – оттаивание
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

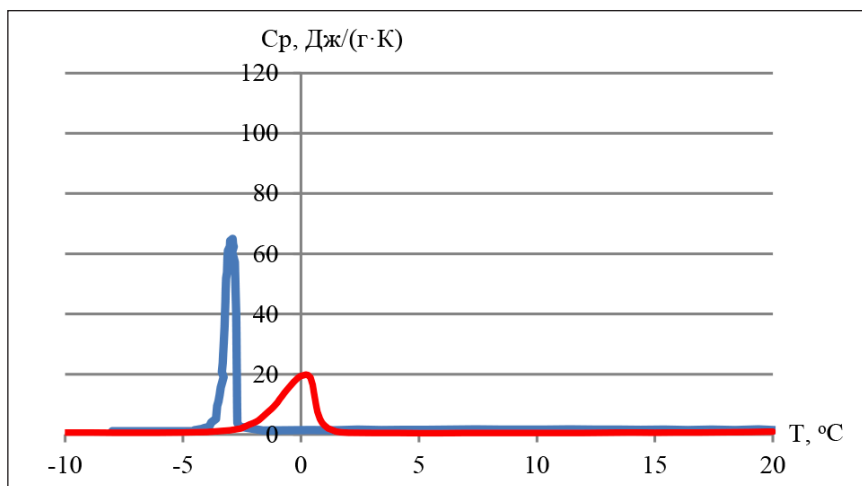


Рис. 5. Зависимость эффективной удельной теплоемкости песка от температуры. $W = 15\%$.
Синяя линия – заморзание, красная линия – оттаивание
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

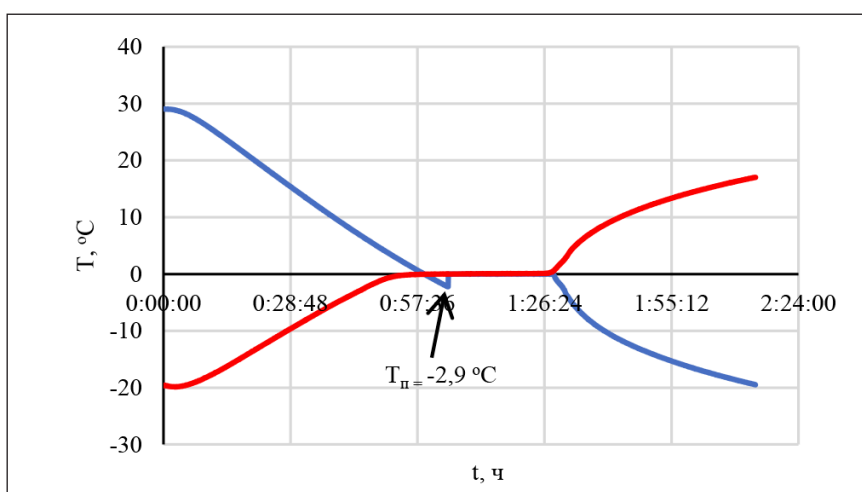


Рис. 6. Термограмма заморзания – оттаивания песка с влажностью $W = 15\%$.
Синяя линия – заморзание, красная линия – оттаивание
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

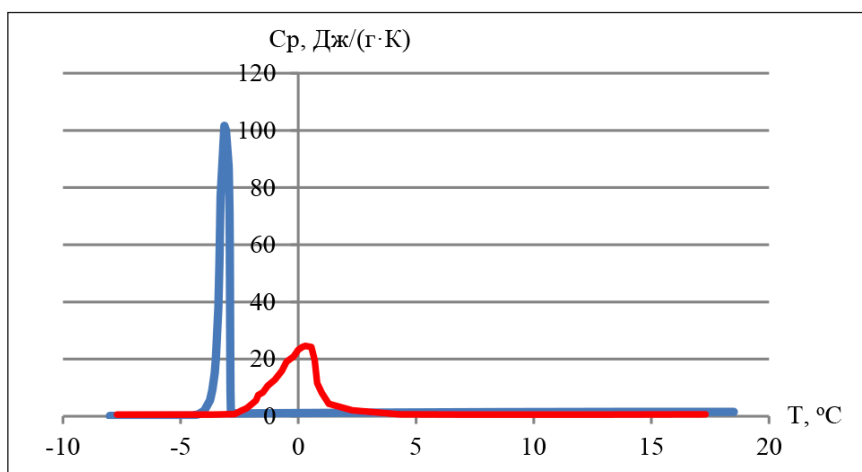


Рис. 7. Зависимость эффективной удельной теплоемкости песка от температуры. $W = 20\%$.

Синяя линия – замерзание, красная линия – оттаивание

Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

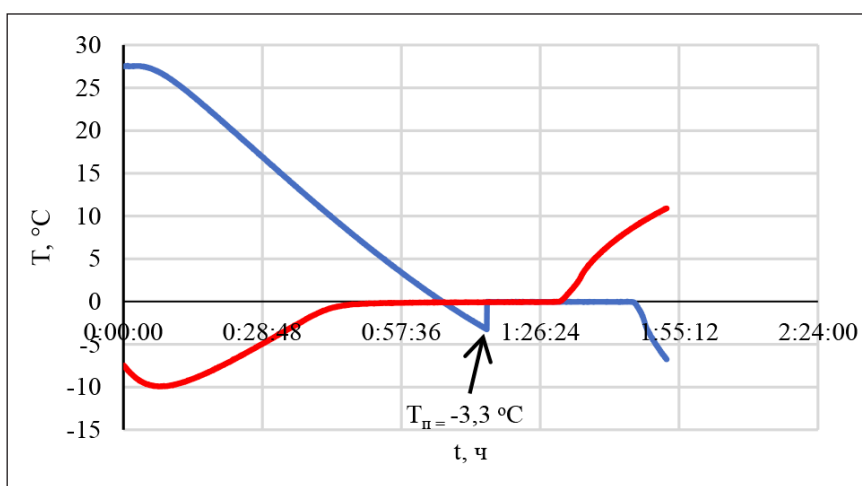


Рис. 8. Термограмма замерзания – оттаивания песка с влажностью $W = 20\%$.

Синяя линия – замерзание, красная линия – оттаивание

Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Из термограмм (рис. 4, 6, 8) видно, что температура фазового перехода практически не зависит от влажности исследуемого песка и приблизительно равна $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, а длительность фазового перехода зависит от влажности. При повышении влажности увеличивается длительность фазового перехода:

$W = 10\% - t = 14\text{ мин};$

$W = 15\% - t = 24\text{ мин};$

$W = 20\% - t = 30\text{ мин}.$

В то же время температура переохлаждения $T_{\text{п}}$ меняется с изменением влажности. С увеличением влажности песка температура переохлаждения сдвигается в сторону более низких значений. Считается, что оптимальный интервал по влажности для переохлаждения – значения от 10 до 15%.

При влажности выше 20% вода заполняет большинство пор грунта, и температура переохлаждения снижается [15]. На рис. 4, 6, 8 наблюдается подобная картина. При влажности 10% температура переохлаждения равна $-2,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, при $W = 15\% - T = -2,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, а при влажности $W = 20\%$ наблюдается самая низкая температура переохлаждения $T = -3,3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Сравнивая графики замерзания (синяя линия) на рис. 3 и 4 ($W = 10\%$), можно сказать, что температуре переохлаждения воды, равной $-2,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 4), соответствует правая ветвь пика удельной теплоемкости (рис. 3). Левая ветвь пика показывает фазовый переход вода – лед. Такая же картина наблюдается и при $W = 15, 20\%$.

Выводы

Были исследованы песчаные грунты с влажностью 10, 15, 20% при цикле заморозания – оттаивания в диапазоне температур от +23 до -10 °C. Калориметрическим методом были получены данные по эффективной удельной теплоемкости, а термограммы для определения точки начала заморозания – криоскопическим методом. Выявлено следующее:

1. По результатам экспериментальных исследований были зафиксированы пики эффективной удельной теплоемкости, которые возникают при фазовых переходах вода – лед, лед – вода.

2. Значения этих пиков зависят от влажности грунта. Как при заморозании, так и при оттаивании с увеличением влажности значения пиков эффективной удельной теплоемкости возрастают.

3. В незасоленных песках температура фазового перехода не зависит от влажности и приблизительно равна 0 °C, в то же время продолжительность фазового перехода зависит.

4. Влажность песка влияет на температуру переохлаждения.

Для более глубокого понимания механизма влияния влажности и температуры на удельную теплоемкость необходимо провести дополнительные исследования.

Список литературы

1. Мурашко А.А., Бровка Г.П., Агутин К.А. Методы мониторинга температурного режима и негативных геокриологических процессов в природно-территориальном комплексе Белорусской антарктической станции // Общероссийская научно-практическая конференция «Изучение опасных природных процессов и геотехнический мониторинг при инженерных изысканиях» (г. Москва, 22 марта 2024 г.). М.: Геомаркетинг, 2024. С. 69–78. [Электронный ресурс]. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=68556547> (дата обращения: 28.11.2025). EDN: NCHNHW.
2. Пермяков П.П. Математическое моделирование негативных мерзлотных процессов. Новосибирск: Сибирское отделение РАН, 2023. 163 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=55038627> (дата обращения: 01.12.2025). ISBN 978-5-6048598-7-2.
3. Гаврильев Р.И. Теплофизические свойства горных пород и напочвенных покровов криолитозоны. [Электронный ресурс]. Новосибирск: Издательство СО РАН, 1998. 280 с. URL: <https://nlrs.ru/open/111237> (дата обращения: 01.12.2025). ISBN 5-7692-0153-3.
4. Степанов А.В., Тимофеев А.М. Теплофизические свойства дисперсных материалов. Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1994. 124 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25481619> (дата обращения: 15.09.2025). ISBN 5-7623-0848-0.

5. Чеверев В.Г., Сафронов Е.В., Алексеев А.Г., Гречищева Э.С. Лабораторные методы определения теплофизических характеристик мерзлых и талых грунтов: аналитический обзор // Инженерная геология. 2022. Т. 17. № 1. С. 64–72. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49937081> (дата обращения: 03.07.2025). DOI: 10.25296/1993-5056-2022-17-1-64-72. EDN: HYWWWDG.

6. Тимофеев А.М., Степанов А.В., Кравцова О.Н., Протодьяконова Н.А., Таппырова Н.И. Расчет тепломассообменных свойств грунтов с крупнообломочными включениями // Естественные и технические науки. 2021. № 12 (163). С. 204–207. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47927638> (дата обращения: 03.09.2025). DOI: 10.25633/ETN.2021.12.24.

7. Kravtsova O.N., Protodyakonova N.A., Timofeev A.M., Stepanov A.V., Malyshev A.V., Tappyrova N.I. Calculation of thermal conductivity of fine soils taking into account the quantity of unfrozen water // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2023. Vol. 60 (3). P. 223–228. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=62548365> (дата обращения: 03.09.2025). DOI: 10.1007/s11204-023-09885-0.

8. Иванов В.А., Большев К.Н., Шаренкова Н.В., Степанов А.А., Андреев А.С. Разработка и применение измерительных комплексов для автоматизации натурных испытаний и экспериментальных исследований // IX Международная конференция по математическому моделированию, посвященная 75-летию Владимира Николаевича Врагова (г. Якутск, 27 июля – 01 августа 2020 г.). Якутск: Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, 2020. С. 157–158. [Электронный ресурс]. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44805244> (дата обращения: 10.10.2025). EDN: TFJCCP.

9. Тимофеев А.М., Кравцова О.Н., Таппырова Н.И., Иванов В.А., Протодьяконова Н.А. Расчетно-экспериментальный способ определения удельной теплоемкости дисперсного грунта и связанной воды // Вестник Международной академии холода. 2019. № 4. С. 92–97. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41496112> (дата обращения: 07.10.2025). DOI: 10.17586/1606-4313-2019-18-4-92-97.

10. ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. М.: Стандартинформ, 2020. 38 с.

11. ГОСТ 32727-2014. Дороги автомобильные общего пользования. Песок природный дробленый. Определение гранулометрического (зернового) состава и модуля крупности. М.: Стандартинформ, 2020. 4 с.

12. Григорьев Б.В. Развитие калориметрического метода измерения содержания незамерзшей воды в грунте при отрицательной температуре // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2020. Т. 6. № 31 (21). С. 87–99. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42736298> (дата обращения: 07.09.2025). DOI: 10.21684/2411-7978-2020-6-1-87-99.

13. Михайлова А.А., Мотенко Р.Г. Температура начала заморозания затопленных нефтезагрязненных песков // XV Международная научно-практическая конференция «Инновационные идеи молодых исследователей» (г. Уфа, 24 сентября 2024 г.). Уфа: ООО Научно-издательский центр «Вестник науки», 2024. С. 180–185. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=72853430> (дата обращения: 03.09.2025). EDN: ZFWNFW.

14. ГОСТ Р 71043-2023. Грунты. Метод лабораторного определения температуры начала заморозания и температуры конца оттаивания. М.: Российский институт стандартизации, 2023. 16 с.

15. Веселов В.В., Беляков В.А. Теплоизолированный малогабеленный фундамент: работа в сезонно-промерзающих грунтах и практика теплового расчета // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 8. С. 13–18. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17105717> (дата обращения: 03.09.2025).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: НИР FWRS-2024-0032 Исследование тепломассообменных процессов в многокомпонентных дисперсных средах для повышения надежности и безопасности технических систем в условиях глобальных изменений криолитозоны.

Financing: Research and development project FWRS-2024-0032: Study of heat and mass transfer processes in multicomponent dispersed media to improve the reliability and safety of technical systems under conditions of global changes in the cryolithozone.

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

УДК 622.7:621.928.8
DOI 10.17513/use.38465

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЫСОКОГРАДИЕНТНОЙ
МАГНИТНОЙ СЕПАРАЦИИ: ОБЗОР МЕТОДА
И АЛГОРИТМ КОМПЛЕКСНОГО ПОДХОДА**

**Степанов Д.В., Александрова Т.Н. ORCID ID 0000-0002-3069-0001,
Николаева Н.В. ORCID ID 0000-0001-7492-1847**

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», Санкт-Петербург,
Российская Федерация, e-mail: s.dmittry@gmail.com*

Высокоградиентная магнитная сепарация представляет собой один из наиболее перспективных методов обогащения минерального и техногенного сырья, обеспечивающий эффективное извлечение тонкодисперсных слабомагнитных компонентов. В условиях истощения месторождений с высоким содержанием ценных компонентов и усложнения горно-геологических условий добычи особую актуальность приобретает повышение эффективности и энергоэкономичности процессов переработки. Целью исследования является обоснование методического подхода к оптимизации конструктивных параметров матрицы высокоградиентного магнитного сепаратора методом моделирования для повышения эффективности сепарации минерального и техногенного сырья. Проведен анализ 120 источников отечественных и зарубежных авторов, опубликованных в рецензируемых журналах и сборниках конференций, из которых 41 отобран для детального изучения. Рассмотрены основные направления моделирования, включая расчет магнитных полей методом конечных элементов, моделирование движения частиц методом дискретных элементов и вычислительную гидродинамику. Показано, что комплексное применение указанных методов позволяет учитывать взаимное влияние магнитных, гидродинамических и механических факторов, повышая точность прогнозирования технологических показателей и снижая потребность в экспериментальных исследованиях. На основе анализа научно-технической литературы приведена характеристика комплексного моделирования матриц, а результаты обзора подтверждают целесообразность интеграции методов математического моделирования в процесс проектирования и модернизации высокоградиентных магнитных сепараторов.

Ключевые слова: высокоградиентная магнитная сепарация, математическое моделирование, программное моделирование, матрица, магнитное поле, метод конечных элементов, метод дискретных элементов, вычислительная гидродинамика

**MODELING OF HIGH GRADIENT MAGNETIC
SEPARATION PROCESSES: REVIEW OF THE METHOD
AND ALGORITHM OF THE INTEGRATED APPROACH**

**Stepanov D.V., Aleksandrova T.N. ORCID ID 0000-0002-3069-0001,
Nikolaeva N.V. ORCID ID 0000-0001-7492-1847**

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
“St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II”,
Saint Petersburg, Russian Federation, e-mail: s.dmittry@gmail.com*

High-gradient magnetic separation is one of the most promising methods for the beneficiation of mineral and technogenic raw materials, providing efficient recovery of fine weakly magnetic particles. Under conditions of depletion of high-grade ore deposits and increasing complexity of mining and geological environments, improving the efficiency and energy performance of processing technologies becomes particularly relevant. The purpose of this study is to substantiate a methodical approach to optimizing the structural parameters of the matrix through modeling in order to enhance the separation efficiency of mineral and technogenic materials. A review of 120 domestic and foreign sources published in peer-reviewed journals and conference proceedings was conducted, of which 41 were selected for detailed analysis. The main modeling approaches are considered, including magnetic field calculation using the finite element method, particle motion simulation by the discrete element method, and computational fluid dynamics. It is shown that the integrated application of these methods enables accounting for the interrelated magnetic, hydrodynamic, and mechanical factors, thereby improving the accuracy of process performance prediction and reducing the need for extensive experimental studies. Based on the analysis of scientific and technical literature, description of the comprehensive modeling of matrices is proposed. The results of the review confirm the feasibility of integrating mathematical modeling methods into the design and modernization of high-gradient magnetic separators.

Keywords: high-gradient magnetic separation, mathematical modeling, software modeling, matrix, magnetic field, finite element method, discrete element method, computational fluid dynamics

Введение

В рамках стратегий развития стран и предприятий особое внимание уделяется текущему состоянию и вектору развития отечественного минерально-сырьевого комплекса [1; 2]. Актуальность проблемы снижения числа легкообогатимых руд и усложнения горно-геологических условий добычи и схем переработки в контексте повышения спроса на стратегические металлы и контроля за соблюдением экологических требований способствует вовлечению в переработку техногенных месторождений и отходов недропользования [3-5].

Высокоградиентная магнитная сепарация (ВГМС) является одним из основных методов извлечения тонкоизмельченных слабомагнитных материалов из минерального природного и техногенного сырья [6-8] и, на фоне растущих требований к эффективности и экологичности процессов разделения магнитных частиц, может применяться во многих отраслях – от горнодобывающей промышленности до биотехнологий и очистки технических жидкостей [9; 10].

Экспериментальное исследование магнитных и гидродинамических явлений, происходящих внутри рабочей зоны ВГМС, связано с большими временными и финансовыми затратами, а также техническими ограничениями. В этих условиях математическое моделирование становится мощным инструментом анализа и оптимизации процессов, позволяя детально исследовать распределение магнитного поля, движение частиц и гидродинамику пульпы без необходимости дорогостоящих экспериментов. Применение численных методов, таких как FEM, CFD и DEM, открывает возможность для создания мультифизических моделей, которые обеспечивают глубокое понимание взаимосвязей между параметрами конструкции и технологическими показателями процесса [11].

Несмотря на широкое распространение методов численного моделирования, в настоящее время отсутствует единый алгоритм или методологически обоснованный подход, учитывающий специфику магнитно-гидродинамических процессов, протекающих в матричных системах ВГМС. При этом именно комплексное описание взаимодействия магнитных, гидродинамических и механических факторов определяет достоверность и инженерную применимость результатов моделирования. Следует отметить, что в отечественной научной и проектной практике такие подходы развиты недостаточно: публикации, посвящен-

ные моделированию матриц ВГМС, носят фрагментарный характер и не формируют целостной методологии оптимизации конструктивных параметров.

Проведение комбинированных исследований, включающих методы компьютерного моделирования, демонстрирует существенные преимущества по сравнению с традиционными экспериментальными исследованиями благодаря ресурсной эффективности, обеспечивающей значительное снижение материальных и временных затрат при сохранении высокой точности результатов [12]. Среди достоинств моделирования также стоит отметить масштабируемость, позволяющую моделировать сложные многоуровневые системы, и управляемость процесса, дающую возможность варьирования временных параметров и многократного повторения экспериментов [13; 14].

Современный этап характеризуется использованием сложных многомасштабных моделей, интеграцией различных физических процессов (магнитных, гидродинамических, механических), а также применением универсальных программных платформ – таких как COMSOL Multiphysics [10], Ansys [15] и др. Моделирование становится неотъемлемой частью процесса проектирования и модернизации сепараторов, позволяя существенно сократить экспериментальные затраты и повысить эффективность технологий на этапе НИОКР.

Таким образом, **цель данной работы** заключается в обосновании методологического подхода к оптимизации конструктивных параметров матрицы высокоградиентного магнитного сепаратора методом моделирования для повышения эффективности сепарации минерального и техногенного сырья.

Материалы и методы исследования

Исследование выполнено в формате систематического обзора научной и технической литературы по тематике моделирования процессов высокоградиентной магнитной сепарации. Основным источником информации послужили рецензируемые публикации в международных журналах, индексируемых в базах данных BAK, Scopus и Web of Science, а также статьи из профильных конференций по прикладной механике, физике магнитных явлений и обогащению полезных ископаемых. Проведен анализ 120 источников отечественных и зарубежных авторов, опубликованных в рецензируемых журналах и сборниках конференций, из которых 41 отобран для детального изучения.

Исследование основано на принципах системности и междисциплинарного анализа. В качестве основного инструмента использован структурированный обзор научных публикаций, отражающих применение математического и программного моделирования в технологических задачах, решаемых с применением высокоградиентной магнитной сепарации.

Результаты исследования и их обсуждение

Направления моделирования в области ВГМС

На основе анализа научно-технической литературы была проведена систематизация исследований в области ВГМС, направленных на разработку эффективных технологических решений и совершенствование конструкций с применением моделирования (табл. 1).

Основываясь на анализе полученных данных, представленных в таблице 1, авторы определили пять основных направлений исследований в области ВГМС, в которых для достижения различных целей использовались результаты моделирования: изучение поведения (движения) частиц, изучение характеристик магнитного поля, оптимизация геометрических параметров и материала матричных элементов, исследование влияния параметров материала на показатели магнитной сепарации и обоснование конструкции матричного блока.

Первое направление объединяет исследования, в которых моделирование используется как для оптимизации уже существующих конструкций, так и для разработки принципиально новых матриц и сепараторов. Основной подход заключается в моделировании и анализе распределения магнитного поля и магнитного градиента, включая расчет баланса сил и вероятности захвата частиц [10; 16; 17]. Важным аспектом является подбор конструкции стержневых матриц и их геометрических параметров для достижения заданной селективности разделения: диаметр стержней и шаг сетки определяют эффективность разделения крупной и мелкой фракций, что подтверждается экспериментально на полупромышленных и промышленных образцах [18]. Современные методы, включая двумерное и трехмерное МКЭ-моделирование [19], также позволяют прогнозировать локальные изменения поля, оценивать величину магнитного градиента и уточнять распределение потоков.

Второе направление включает в себя исследования влияния характеристик частиц на захват и эффективность выделения сла-

бомагнитных минералов. Стоит отметить, что перспективным является применение ВГМС с циркулирующей магнитной жидкостью [20-22], то есть добавлением раствора $MnCl_2$ в пульпу для повышения контрастности магнитных свойств разделяемых минералов. Результаты численного моделирования процесса захвата частиц согласуются с результатами экспериментов и также подтверждают преобразование конкурирующего процесса захвата в механический захват при обработке слабомагнитных минералов с помощью технологии высокоградиентной магнитной сепарации с использованием магнитной жидкости (HGMSCMF).

Задачами исследований третьего направления является определение оптимальной формы поперечного сечения матричного элемента и соотношения его сторон, а также изучение состояния намагниченности матриц и влияния намагниченности (насыщения) матрицы на эффективность захвата частиц.

В работе [23] авторы доказывают, что форма и материал матрицы значительно влияют на процесс достижения матричным элементом насыщения и наибольшего градиента напряженности магнитного поля. Интерпретируя результаты сравнения магнитной силы, можно сделать вывод о том, что эллиптическая и квадратная матрицы могут генерировать гораздо большую магнитную силу в широком диапазоне расстояний от поверхности.

При этом магнитная сила ромбовидных матриц велика вблизи поверхности, но быстро уменьшается с увеличением расстояния от поверхности. Таким образом, путем подбора оптимальной формы матричного элемента можно повысить извлечение полезных компонентов в концентрат.

В ряде исследований [11; 24; 25] с применением комплексных и численных методов моделирования установлено, что форма и соотношение сторон магнитных матриц существенно влияют на эффективность захвата частиц в высокоградиентных магнитных сепараторах. Показано, что эллиптические, ромбовидные и прямоугольные матрицы, ориентированные вдоль магнитного поля, обеспечивают больший радиус захвата и более высокую эффективность разделения по сравнению с круглыми элементами, особенно при умеренных значениях магнитной индукции. Выявлено существование оптимального соотношения сторон матрицы, которое уменьшается с ростом магнитной индукции и не зависит от размера частиц, что позволяет повысить извлечение ультрадисперсных магнитных минералов и снизить энергозатраты при разработке ВГМС-систем.

Направления моделирования в области ВГМС

Таблица 1

| Направление исследований | Разработанная модель | Программа / Метод | Исследуемые параметры | Ист. |
|--|--|---|--|----------------|
| Исследование новых конструкций матричного блока | Модель траектории движения частиц в потоке жидкости и магнитном поле | COMSOL Multiphysics / FEM, DEM | Область действия магнитного поля, создаваемого матричным элементом | 10; 16 |
| | Модель распределения магнитного поля в рабочем пространстве кассеты / Визуализация индукции поля (магнитная карта) | QuickField software | Распределение магнитного поля мембранной матрицы | 9 |
| | 2D- и 3D-модели распределения магнитного поля в рабочем пространстве матрицы из нержавеющей стали (с применением сверхпроводящего соленоида) | FEM | Магнитные карты поперечных сечений кассет (матриц) различного типа в сепараторах со сверхпроводящими магнитными системами | 17 |
| | Модель оценки траектории частиц для стержневых матриц | FEM / OPERA-3D | Распределение магнитного поля в матричной системе из стальных стержней из нержавеющей стали | 19 |
| Исследование влияния параметров сырья на технологические показатели ВГМС | Модель ВГМС с циркулирующей магнитной жидкостью (HGMSCMF) | н/д | Траектории движения частиц при варьировании диаметра и степени заполнения стержневой матрицы, глубины расположения матрицы в направлении потока пульпы | 18 |
| | Модель ВГМС с разной формой и конфигурацией матричных элементов | COMSOL Multiphysics / FEM, DEM | Захват частиц различного размера | 22 |
| | Расширенные модели захвата частиц в ВГМС, учитывающие магнитные и гидродинамические силы | ANSYS software, COMSOL Multiphysics; Ansys fluent; EDEM / CFD; FEM; DEM | Захват частиц с различными магнитными свойствами | 20; 21 |
| | Модель ВГМС с различным уровнем намагнитченности (насыщения) матричных элементов | Ansys, COMSOL Multiphysics / FEM | Распределение магнитного поля при разной форме поперечного сечения матричного элемента (круглая, эллиптическая, квадратная, ромбовидная и др.) при заданной конфигурации матрицы | 11; 23; 24; 25 |
| Изучение характеристик магнитного поля | 3D-модель ВГМС с эллиптической матрицей | Ansys, COMSOL Multiphysics / FEM | Распределение магнитного поля и определение траекторий движения частиц при разном значении отношения длинной оси матричного элемента к короткой | 26; 27 |
| | Модель ВГМС с различными формами осадительных элементов | Ansys, Magneto / FEM | Распределение магнитного поля в зависимости от намагнитченности (насыщения) матричного элемента при различном соотношении сторон | 15; 28; 29 |
| | Модель ВГМС с эллиптической матрицей | Ansys, Magneto / FEM | Влияние горизонтального зазора и длины длинной оси матрицы на силовые показатели магнитного поля | 30 |
| Изучение движения частиц в ВГМС | Модели отклика (Response Surface Methodology, RSM). Нейросетевое моделирование (Artificial Neural Networks, ANN) | Используется внутреннее ПО компаний – производителей оборудования | Влияние формы поперечного сечения (равностороннего треугольника, квадрата, шестиугольника, восьмиугольника, додекагона и круга) на характеристики распределения магнитного поля | 31 |
| | Модель распределения поля и потока вокруг матрицы | COMSOL Multiphysics / МКЭ | Траектории частиц с учетом влияния их формы, скорости вращения матрицы и скорости подачи материала на траекторию движения частиц | 32 |
| | Модель расчета траектории движения частиц | COMSOL Multiphysics / МКЭ | | 33; 34 |
| | Модель накопления частиц на матричном элементе | SBM-sw и SBM-dw / COMSOL Multiphysics, Matlab | Профиль накопления частиц при определенных параметрах (влияние пульсирующей суспензии, расстояния между проволоками и приложенной магнитной индукции) | 35 |
| | Модель захвата частиц | | Расстояние между магнитными проволоками, расстояние между слоями магнитных проволок, диаметр элемента | 36; 37; 38; 39 |
| Источник: составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследования. | | | | 40 |

В работе [26] предложена концепция соответствия между геометрией матрицы и магнитной индукцией, при котором достигается максимальный радиус захвата частиц; оптимальное соотношение сторон зависит от величины индукции и не связан с размерами частиц или матрицы. В исследовании [27] уточнено соотношение размеров магнитного элемента и частицы, обеспечивающее максимальный захват, выведены уравнения для магнитной силы и сопротивлениям и определены условия захвата.

В работе [15] методом численного моделирования изучено влияние соотношения сторон и степени намагниченности матриц из железа и стали SUS430 на эффективность улавливания частиц; показано, что с ростом значения коэффициента соотношения сторон расширяется диапазон индукций, при которых достигается насыщение и повышается эффективность захвата слабомагнитных минералов. В исследовании [28] разработана математическая модель для прогнозирования состояния намагниченности и учтено влияние магнитных взаимодействий между элементами, зависящих от угла между полем и линией их соединения, что позволяет оптимизировать конфигурацию матрицы и снижать энергопотребление. В работе [29] установлена зависимость намагниченности от формы и ориентации матрицы в магнитном поле, доказано влияние геометрии поперечного сечения на точность расчетов и степень намагничивания.

Четвертое направление посвящено изучению характеристик магнитного поля, создаваемого в ВГМС, включая анализ особенностей распределения магнитного потока и установление взаимосвязей между геометрией матрицы и силовыми показателями магнитного поля.

В работе [30] численным моделированием и экспериментами показано, что в многоматричных системах с эллиптическими матрицами усиливается взаимодействие индуцированных полей, что повышает магнитную индукцию, но снижает градиент поля и магнитную силу, сокращая зону захвата частиц. Оптимизация расстояния между матрицами и их размеров позволяет регулировать уровень накопления частиц на осадительном элементе, при этом расхождение между расчетными и экспериментальными данными не превышает 4,3%. В исследовании [31] установлено, что форма поперечного сечения влияет на параметры магнитного поля: по интенсивности поля и градиента

они убывают в ряду треугольник – квадрат – шестиугольник – восьмиугольник – додекагон – круг; применение зубчатых пластин вместо цилиндров повышает извлечение ильменита до 45% при тех же условиях намагничивания.

Пятое направление посвящено изучению поведения частиц в ВГМС. При помощи различных программных пакетов рассчитывается траектория движения и устанавливаются закономерности захвата и накопления матрицей мелких частиц минералов с целью увеличения селективности и эффективности сепарации.

В работе [32] рассмотрены модели движения частиц в магнитном поле сепаратора, включая механистические, статистические и нейросетевые (ANN) подходы; показано, что физически точные модели сложны в применении, тогда как ANN-модели эффективны для прогнозирования, но не раскрывают физику процесса. В исследованиях [33] и [34] с помощью моделирования и экспериментов установлено, что асимметричные пульсации и регулирование скорости потока повышают селективность разделения, а оптимизация формы импульсов предотвращает засорение матрицы. В работе [35] методом конечных элементов смоделировано влияние скорости подачи и вращения матрицы в центробежной ВГМС, показано образование спирального потока и сдвиговых напряжений, улучшающих селективность и эффективность разделения.

В работах [36; 37] представлена статическая модель SBM, описывающая накопление частиц на матрице с учетом влияния магнитной индукции, скорости потока и геометрии элементов, позволяющая прогнозировать профиль и массу осадка. Однако для реальных условий предпочтительнее динамические модели: в [38] предложена зависимость от частоты пульсаций модель, учитывающая влияние магнитных и гидродинамических сил на скорость образования отложений. В [39] показано, что поочередная подача мелкой и крупной фракции повышает извлечение и селективность – массовая доля захваченных частиц до 20 мкм увеличивается более чем вдвое, а содержание железа возрастает до 62%. В исследовании [40] с использованием имитационного моделирования предложена комбинированная вращающаяся матрица, обеспечивающая повышение эффективности центробежной ВГМС при разделении мелкодисперсных руд.

Таблица 2

Характеристика методов CFD, FEM и DEM в области ВГМС

| Метод | Процесс | Область применения | Цель моделирования | Допущения, упрощения |
|-------|-------------------------------------|--|---|--|
| FEM | Моделирование магнитного поля | Генерации точного распределения магнитного поля в геометрически сложных конфигурациях (основано на решении уравнений Ньютона для каждой отдельной частицы) | Оптимизация геометрии матриц ВГМС (форма, конфигурация и т.д.) | Увеличение числа узлов FEM и ячеек FVM резко повышает вычислительные затраты. Для 3D-моделирования рекомендуется объединение расчетов FEM и CFD в одной сетке |
| CFD | Моделирование гидродинамики | Магнитные диполь-дипольные взаимодействия (на основе уравнений Розенсвейга и Сато), механические силы (упругость, демпфирование), центробежные силы (при моделировании МЕС – магнитно-усиленной центрифугирования) | Движение жидкости (носителя частиц) – скорость, давление, вихри, траектории частиц в потоке. CFD показывает, куда и как «плывут» частицы, прежде чем начнут взаимодействовать между собой | Не учитывает взаимодействие частиц между собой – ни магнитное, ни механическое. Результаты моделирования более достоверны, когда частицы разрежены и не сталкиваются |
| DEM | Моделирование взаимодействий частиц | Моделирование потока жидкости, в который встроено FEM-поле. Движение частиц анализируется с учетом действующих магнитных и гидродинамических сил (используется сила Лоренца) | Моделирование агрегации частиц с учетом контактных сил, исследование влияния центробежной силы, анализ формы и плотности осадка | Магнитные частицы рассматриваются как магнитные диполи, даже несмотря на то, что их ядра не бесконечно малы. Поле вокруг более чем одного диполя не рассчитывается точно, так как их поля взаимодействуют, усиливая или ослабляя друг друга. В моделировании учитывается только ближайший элемент в системе частиц. Гидродинамические силы влияют на кинетику, но не изменяют окончательную форму осадка или его устойчивость к центробежным силам. Поверхностные силы, включая капиллярные, пренебрегаются, что допустимо при рассматриваемых размерах частиц. Магнитные частицы не искажают поле. Для упрощения модели считается, что все частицы выстраиваются вдоль направления внешнего магнитного поля |

Источник: составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Комплексное моделирование протекающих при ВГМС процессов

Комплексное моделирование с использованием трех методов (CFD, FEM и DEM) показывает высокую степень реалистичности и является перспективным подходом для оптимизации процессов ВГМС. Суть комбинированного метода заключается в расчете магнитных полей с помощью ме-

тода конечных элементов (FEM), результаты которого загружаются в моделирование как в CFD (вычислительную гидродинамику), так и в DEM (метод дискретных элементов). Особенности вышеперечисленных методов представлены в таблице 2.

Как было отмечено ранее, важным направлением является вычисление траектории и вероятности улавливания и удержания частицы на матричном осадительном элементе.



Рабочий алгоритм комплексного моделирования ВГМС-процессов
 Источник: составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследования

Расчет и, как следствие, моделирование поведения частиц в рабочей зоне сепаратора сводится к решению уравнения баланса сил, действующих на частицу. Для крупных частиц наибольшее влияние оказывает сила тяжести, для мелких – вязкое сопротивление. В мокрой сепарации необходимо, чтобы магнитная сила превышала гидродинамическое сопротивление, в то время как в сухой сепарации – силу тяжести [41]. Данный баланс сил справедлив, если разделение на фракции происходит в воде. Если в рабочую зону сепаратора добавляются парамагнитные вещества (например, $MnCl_2$), повышающие контрастность магнитных свойств разлепляемых частиц, то необходимо также учитывать данный эффект при расчете и моделировании протекающих процессов [21].

ВГМС – сложный физико-технический процесс, где участвуют магнитные поля, жидкости (поток), частицы и их взаимодействия. На основе проведенных исследований предложен алгоритм моделирования, представленный на рисунке.

Представленный на рисунке алгоритм иллюстрирует интегрированный подход к численному моделированию процессов высокоградиентной магнитной сепарации, включающий три взаимосвязанных этапа. На первом этапе (FEM) проводится моделирование магнитного поля: создается геометрия матрицы, задаются физические свойства материалов и рассчитываются распределения магнитного потенциала и гра-

диента поля. На втором этапе (CFD) моделируется движение жидкости и траектории частиц с учетом магнитных и гидродинамических сил, что позволяет определить зоны осаждения и оценить эффективность захвата. На третьем этапе (DEM) анализируются взаимодействия между частицами, формирование и разрушение агломератов, устойчивость и структура осадка. Такой комплексный подход обеспечивает детальное понимание взаимосвязей между магнитными, гидродинамическими и механическими процессами в зоне разделения и используется для оптимизации конструкции и режима работы ВГМС-систем.

Заключение

В условиях роста требований к эффективности и селективности процессов обогащения применение математического моделирования в задачах высокоградиентной магнитной сепарации становится неотъемлемой частью научно-технического прогресса.

В результате проведенного обзора и анализа научных публикаций по тематике математического моделирования процессов высокоградиентной магнитной сепарации установлено, что моделирование является эффективным инструментом для оптимизации конструкции сепараторов и повышения эффективности процессов разделения. Показано, что применение численных методов позволяет комплексно учитывать магнит-

ные, гидродинамические и механические взаимодействия, обеспечивая высокую точность воспроизведения реальных условий работы оборудования.

Обосновано, что использование методов математического моделирования при проектировании и модернизации ВГМС-систем позволяет существенно сократить объем экспериментальных работ, повысить точность прогнозирования технологических параметров и снизить затраты на НИ-ОКР. Показан методологический подход к оптимизации конструкции матрицы ВГМС на основе мультифизического моделирования, включающего совокупное применение методов конечных, дискретных элементов и вычислительной гидродинамики.

Таким образом, подтверждена целесообразность интеграции математического моделирования в процесс конструирования и совершенствования высокоградиентных магнитных сепараторов как ключевого инструмента повышения эффективности технологий переработки минерального и техногенного сырья.

Список литературы

1. Литвиненко В.С., Петров Е.И., Василевская Д.В., Яковенко А.В., Наумов И.А., Ратников М.А. Оценка роли государства в управлении минеральными ресурсами // Записки Горного института. 2023. Т. 259. С. 95–111. DOI: 10.31897/PMI.2022.100.
2. Zhukovskiy Y., Tsvetkov P., Koshenkova A., Skvortsov I., Andreeva I., Vorobeva V. A Methodology for Forecasting the KPIs of a Region's Development: Case of the Russian Arctic // Sustainability. 2024. Vol. 16. P. 6597. DOI: 10.3390/su16156597.
3. Пашкевич М.А., Алексеенко А.В., Нуреев Р.Р. Формирование экологического ущерба при складировании сульфидсодержащих отходов обогащения полезных ископаемых // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 155–167. DOI: 10.31897/PMI.2023.32.
4. Argimbaev K., Ligotsky D., Mironova K., Loginov E. Investigations on material composition of iron-containing tails of enrichment of combined mining and processing in Kursk magnetic anomaly of Russia // International Journal of Engineering, Transactions A: Basics, 2020. Vol. 33. № 7. P. 1431–1439. DOI: 10.5829/ije.2020.33.07a.31.
5. Орехова Н.Н., Глаголева И.В. Совершенствование технологии переработки лежалого медистого клинкера // Успехи современного естествознания. 2023. № 6. С. 104–112. DOI: 10.17513/use.38060.
6. Пелевин А.Е. Технологии обогащения железных руд России и пути повышения их эффективности // Записки Горного института. 2022. Т. 256. С. 579–592. DOI: 10.31897/PMI.2022.61.
7. Aleksandrova T., Nikolaeva N., Afanasova A., Chenlong D., Romashev A., Aburova V., Prokhorova E. Increase in Recovery Efficiency of Iron-Containing Components from Ash and Slag Material (Coal Combustion Waste) by Magnetic Separation // Minerals. 2024. Vol. 14. № 2. P. 136. DOI: 10.3390/min14020136.
8. Aleksandrova T., Afanasova A., Nikolaeva N., Romashev A., Aburova V., Prokhorova E. Investigation of the Possibility of Obtaining High-Purity Carbon Materials and Recovering Valuable Metals from Shungite Rocks // Minerals. 2025. Vol. 15. № 1. P. 90. DOI: 10.3390/min15010090.
9. Podoynitsyn S.N., Sorokina O.N., Kovarski A.L. High-gradient magnetic separation using ferromagnetic membrane // Journal of Magnetism and magnetic Materials. 2016. Vol. 397. P. 51–56. DOI: 10.1016/j.jmmm.2015.08.075.
10. Tesanovic M., de Souza J.P., Bazant M.Z., Berensmeier S. Magnetic particle capture in high-gradient magnetic separation: A theoretical and experimental study // AICHE Journal. 2025. Vol. 71. № 5. P. e18733. DOI: 10.1002/aic.18733.
11. Lindner J., Menzel K., Nirschl H. Simulation of magnetic suspensions for HGMS using CFD, FEM and DEM modeling // Computers & chemical engineering. 2013. Vol. 54. P. 111–121. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2013.03.012.
12. Ромашев А.О., Николаева Н.В., Гатиатуллин Б.Л. Формирование адаптивного подхода с применением технологии машинного зрения для определения параметров осаждения продуктов обогащения // Записки Горного института. 2022. Т. 256. С. 677–685. DOI: 10.31897/PMI.2022.77.
13. Pervuhin D.A., Trushnikov V.E., Abramkin S.E., Hloponina V.S., Talanov N.A. Development of Methods to Improve Stability of Underground Structures Operation // International Journal of Engineering, Transactions B: Applications. 2025. Vol. 38 (02). P. 472–487. DOI: 10.5829/ije.2025.38.02b.20.
14. Протосеня А.Г., Веселова А.В. Оценка влияния карстовой полости на устойчивость рудного массива при разработке месторождений Западной Якутии // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2025. № 1-1. С. 33–46. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_11_0_33.
15. Wang Y., Xue Z., Zheng X., Lu D., Li S., Li X. Effect of matrix saturation magnetization on particle capture in high gradient magnetic separation // Minerals Engineering. 2019. Vol. 139. P. 105866. DOI: 10.1016/j.mineng.2019.105866.
16. Кондратенко И.П., Некрасов А.В., Волканин Е.Е. Электротехническая система с составными стержнями для высокоградиентной магнитной сепарации // Электротехника и электромеханика. 2012. № 2. С. 38–41. EDN: RVLTVZ.
17. Тагунов Е.Я., Измалков В.А., Пучков В.А., Диев Д.Н. Особенности конструирования полиградиентных матриц для высокоградиентных сепараторов со сверхпроводящими магнитными системами // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. № 9. С. 102–114. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-09-0-102-114.
18. Liu J., Dai H., Yu L., Wang C., Feng J., Li P., Xu S. Optimization of the Matrix in a Transverse-Field High-Gradient Magnetic Separator for an Improved Ilmenite Separation // Minerals. 2025. Vol. 15. P. 114. DOI: 10.3390/min15020114.
19. Baik S.K., Ha D.W., Ko R.K., Kwon J.M. Magnetic field analysis of high gradient magnetic separator via finite element analysis // Physica C: Superconductivity. 2012. Vol. 480. P. 111–117. DOI: 10.1016/j.physc.2012.04.036.
20. Zheng X., Cheng W., Cheng J., Shuwak S., Yue X., Li B., Wang Y. Enhancing the separation of refractory weakly magnetic minerals with magnetic fluid in high gradient magnetic separation: Conversion of competing capture to mechanical entrapment // Separation and Purification Technology. 2024. Vol. 335. P. 126273. DOI: 10.1016/j.seppur.2024.126273.
21. Zhou S., Wang Y., Zheng X., Lu D., Xia F., Cheng W. Study on capture behaviors of particles with different magnetic characteristics in axial high gradient magnetic separation coupling with magnetic fluid // Minerals Engineering. 2025. Vol. 227. P. 109261. DOI: 10.1016/j.mineng.2025.109261.
22. Zheng X., Du L., Wang Y., Lu D. Effect of particle size on capture and separation of refractory weakly magnetic minerals in high gradient magnetic separation coupling with magnetic fluid // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2025. Vol. 13. № 2. P. 115918. DOI: 10.1016/j.jece.2025.115918.
23. Zheng X., Guo N., Cui R., Lu D., Li X., Li M., Wang Y. Magnetic field simulation and experimental tests of special cross-sectional shape matrices for high gradient magnetic separation // IEEE Transactions on Magnetics. 2016. Vol. 53. № 3. P. 1–10. DOI: 10.1109/TMAG.2016.2635629.
24. Xue Z., Wang Y., Zheng X., Lu D., Sun, Z. Study on optimal aspect ratio for diamond matrices in axial high gradient

- magnetic separation // Minerals Engineering. 2021. Vol. 160. P. 106699. DOI: 10.1016/j.mineng.2020.106699.
25. Xue Z., Wang Y., Zheng X., Lu D., Li, X. Particle capture of special cross-section matrices in axial high gradient magnetic separation: A 3D simulation // Separation and Purification Technology. 2020. Vol. 237. P. 116375. DOI: 10.1016/j.seppur.2019.116375.
26. Wang Y., Xue Z., Zheng X., Lu D., Sun Z. Matching relation between matrix aspect ratio and applied magnetic induction for maximum particle capture in transversal high gradient magnetic separation // Minerals Engineering. 2020. Vol. 151. P. 106316. DOI: 10.1016/j.mineng.2020.106316.
27. Zeng J., Tong X., Ren P., Chen L. Theoretical description on size matching for magnetic element to independent particle in high gradient magnetic separation // Minerals Engineering. 2019. Vol. 135. P. 74-82. DOI: 10.1016/j.mineng.2019.02.042.
28. Liu J., Wang F., Chen J., Xu L., Cao, Q. Insights into the effect of magnetic interactions on the magnetization process of matrices in high gradient magnetic separation // Minerals Engineering. 2021. Vol. 174. P. 107269. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.107269.
29. Xia L., Wang F., Wang L., Li X., Chen J., Cao Q. Understanding and prediction of magnetization state of elliptic cross-section matrices in high gradient magnetic separation // Minerals Engineering. 2021. Vol. 172. P. 107137. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.107137.
30. Zhou L., Li W., Han Y., Li Y., Liu D. Numerical simulation for magnetic field analysis and magnetic adsorption behavior of ellipse magnetic matrices in HGMS: Prediction magnetic adsorption behavior via numerical simulation // Minerals Engineering. 2021. Vol. 167. P. 106876. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.106876.
31. Ren L., Zeng S., Zhang Y. Magnetic field characteristics analysis of a single assembled magnetic medium using ANSYS software // International Journal of Mining Science and Technology. 2015. Vol. 25. № 3. P. 479-487. DOI: 10.1016/j.ijmst.2015.03.024.
32. Tripathy S.K., Banerjee P.K., Suresh N., Murthy Y.R., Singh V. Dry high-intensity magnetic separation in mineral industry – a review of present status and future prospects // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2017. Vol. 38. № 6. P. 339-365. DOI: 10.1080/08827508.2017.1323743.
33. Hu Z., Xue Z., Wang Y., Lu D., Zheng X., Liu, J. Pulsation curves strengthen the high gradient magnetic separation process: Experimental study and simulation explanation // Minerals Engineering. 2022. Vol. 182. P. 107557. DOI: 10.1016/j.mineng.2022.107557.
34. Xue Z., Wang Y., Zheng X., Lu D., Sun Z., Jing Z. Mechanical entrainment study by separately collecting particle deposit on matrix in high gradient magnetic separation // Minerals Engineering. 2022. Vol. 178. P. 107435. DOI: 10.1016/j.mineng.2022.107435.
35. Yi F., Chen L., Zeng J., Ren X., Xiong T., Jiang Y. Rotating flow characteristics in centrifugal high gradient magnetic separation and its effect on particle capture behavior // Minerals Engineering. 2022. Vol. 179. P. 107442. DOI: 10.1016/j.mineng.2022.107442.
36. Xue Z., Wang Y., Zheng X., Lu D., Sun Z., Hu Z. Simulation of particle accumulation in high gradient magnetic separation based on static buildup model (SBM) // Minerals Engineering. 2022. Vol. 175. P. 107290. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.107290.
37. Hu Z., Zhang J., Liu J., Tang Y., Zheng, X. Model of particle accumulation on matrices in transverse field pulsating high gradient magnetic separator // Minerals Engineering. 2020. Vol. 146. P. 106105. DOI: 10.1016/j.mineng.2019.106105.
38. Hu Z., Liu J., Han L., Wang Y., Lu D., Zheng X., Xue Z. Dynamic particle accumulation on a single wire in transverse field pulsating high gradient magnetic separator // Minerals Engineering. 2022. Vol. 183. P. 107609. DOI: 10.1016/j.mineng.2022.107609.
39. Xue Z., Xie J., Zhang B., Li X., Liu M., Chen L. Improving high gradient magnetic separation performance by a fine-coarse feeding strategy // Powder Technology. 2025. Vol. 454. P. 120727. DOI: 10.1016/j.powtec.2025.120727.
40. Yi F., Chen L., Zeng J. Combinatorial optimization of rotating matrix in centrifugal high gradient magnetic separation // Minerals Engineering. 2023. Vol. 202. P. 108309. DOI: 10.1016/j.mineng.2023.108309.
41. Farsi C., Amroune S., Moussaoui M., Mohamad B., Benkherbache, H. High-Gradient Magnetic Separation Method for Weakly Magnetic Particles: an Industrial Application // Metallofizika i Novejsie Tehnologii. 2019. Vol. 41. № 8. DOI: 10.15407/mfint.41.08.1103.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания «Исследование термодинамических процессов Земли с позиции генезиса углеводородов на больших глубинах» FSRW – 2024 – 0008.

Financing: The work was performed within the framework of the state assignment “Investigation of thermodynamic processes of the Earth from the position of hydrocarbon genesis at great depths” FSRW – 2024 – 0008.

СТАТЬЯ

УДК 630*52

DOI 10.17513/use.38466

**ПУЛЫ УГЛЕРОДА В ЭКОСИСТЕМАХ
ПРИБАЙКАЛЬСКОГО ЗАКАЗНИКА ПОСЛЕ ПОЖАРОВ****Мильхеев Е.Ю. ORCID ID 0000-0002-9949-4703,
Чимитдоржиева Г.Д. ORCID ID 0000-0001-8566-3994***Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей
и экспериментальной биологии Сибирского отделения Российской академии наук,
Улан-Удэ, Российская Федерация, e-mail: evgmilh@gmail.com*

Проблема трансформации углеродных пулов в лесных экосистемах под влиянием пожаров важна для понимания глобального цикла углерода. Цель исследования – количественная оценка запасов углерода и анализ их распределения по компонентам фитомассы в светлохвойных лесах Прибайкалья, нарушенных многократными пирогенными воздействиями. Материалы и методы включали закладку пробных площадей на участках с разной степенью пирогенной нагрузки, детальный учет фитомассы и определение содержания углерода в растительных тканях с помощью элементного анализа. В результате установлено, что концентрация углерода существенно различается между видами растений и типами их тканей, причем максимальные значения выявлены в коре лиственных пород и ветвях хвойных пород на гарях. Показано, что применение усредненных коэффициентов для пересчета биомассы в запас углерода приводит к значительной погрешности. Общий запас углерода в экосистеме резко снижается на интенсивно нарушенных пожарами территориях по сравнению с ненарушенными лесами. Восстановительная сукцессия после пожара характеризуется преобладанием кратковременных пулов углерода, таких как валеж и ветви, при активном зарастании травами и замедленном восстановлении древостоя. Таким образом, пожары не только значительно сокращают общие запасы углерода, но и качественно изменяют структуру его пулов, смещая баланс в сторону менее стабильных компонентов, что необходимо учитывать при региональной оценке углеродного бюджета и планировании восстановительных мероприятий.

Ключевые слова: пулы углерода, постпирогенное восстановление, лесные пожары, Прибайкальский заказник**CARBON POOLS IN THE ECOSYSTEMS
OF THE PRIBAIKALSKY NATURE RESERVE AFTER FIRES****Milkheev E.Yu. ORCID ID 0000-0002-9949-4703,
Chimtdorzhieva G.D. ORCID ID 0000-0001-8566-3994***Federal State Budgetary Institution of Sciences Institute of General and Experimental Biology
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, Russian Federation,
e-mail: evgmilh@gmail.com*

The transformation of carbon pools in forest ecosystems under the influence of fires is important for understanding the global carbon cycle. The aim of this study was to quantify carbon stocks and analyze their distribution among phytomass components in light coniferous forests of the Baikal region disturbed by repeated pyrogenic events. The materials and methods included establishing sample plots in areas with varying degrees of pyrogenic load, detailed phytomass recording, and determining the carbon content of plant tissues using elemental analysis. Results revealed that carbon concentrations vary significantly between plant species and tissue types, with the highest values observed in the bark of deciduous trees and branches of conifers in burned areas. It was shown that the use of averaged coefficients for converting biomass to carbon stocks leads to significant errors. The total carbon stock in the ecosystem decreases sharply in areas intensively disturbed by fires compared to undisturbed forests. Post-fire restoration succession is characterized by a predominance of short-lived carbon pools, such as fallen trees and branches, with active grass growth and slower stand regeneration. Thus, fires not only significantly reduce overall carbon stocks but also fundamentally alter the structure of these pools, shifting the balance toward less stable components. This must be taken into account when assessing regional carbon budgets and planning restoration efforts.

Keywords: carbon pools, post-pyrogenic restoration, forest fires, Pribaikalsky Reserve**Введение**

Бореальные леса России представляют собой крупнейший глобальный резервуар углерода, играя ключевую роль в долговременной секвестрации атмосферного углерода посредством аккумуляции органического вещества [1–3]. Современные данные [4] свидетельствуют, что реальный секве-

страционный потенциал данных экосистем на 47% превышает ранние оценки, что подтверждает их исключительную важность для глобальной климатической регуляции.

Несмотря на прогресс в изучении пост-пожарного восстановления [5, 6], остаются дискуссионными вопросы, касающиеся оптимальных методов оценки и управления

углеродными запасами. Исследования [1, 7] показывают, что естественное лесовосстановление может быть эффективным для секвестрации углерода, в то время как антропогенные вмешательства (лесовосстановление, расчистка территорий) способны как ускорить, так и замедлить этот процесс в зависимости от конкретных условий и применяемых методов. Существенную сложность представляет также комплексный учет динамики различных углеродных пулов: живой биомассы, мертвого органического вещества и почвенного углерода в постпирогенный период.

Современные исследования подтверждают, что расчет углеродных запасов для всех видов деревьев с использованием универсального коэффициента (50%) может приводить к значительным погрешностям, что подчеркивает необходимость применения региональных коэффициентов, учитывающих видовую специфику растительности [8]. В российской системе инвентаризации парниковых газов используются фиксированные коэффициенты пересчета биомассы (основанные на таксационных показателях) и рекомендованные МГЭИК значения. Подобный подход не учитывает региональные особенности лесных экосистем, что может вызывать существенные отклонения в оценках изменений углеродных запасов как в надземной биомассе, так и в иных компонентах углеродного бюджета. Для повышения точности необходимы детальные данные о количестве углерода, депонированного в различных типах лесов [2, 9, 10].

Республика Бурятия, обладающая лесистостью 83%, ежегодно теряет до 200 тыс. га лесов в результате пожаров, что ставит под угрозу их функцию как основного депонирующего пула углерода и снижает устойчивость экосистем. Особую опасность представляют пожары на территории Прибайкальского заказника (центральная часть Морского хребта), отличающегося уникальными экосистемами и охранным статусом. Исследуемый регион, прилегающий к объекту Всемирного наследия ЮНЕСКО – оз. Байкал, обладает высокой экологической значимостью, обусловленной ролью в климатической регуляции, предотвращении деградации почв и, что критично, в очистке вод, поступающих в байкальскую акваторию. Территория характеризуется повышенной горимостью вследствие преобладания пожароопасных светлохвойных пород. Постпирогенное восстановление лесов

в условиях засушливого климата Бурятии протекает медленно, с формированием разреженных лиственных насаждений, которые в первые десятилетия не компенсируют углеродные потери. При этом данные о динамике углеродных пулов в постпирогенных фитоценозах данного региона практически отсутствуют.

Цель исследования – количественная оценка содержания и запасов углерода в основных пулах светлохвойных лесов на горах Прибайкальского заказника Республики Бурятия.

Материалы и методы исследования

Прибайкальский заказник расположен в Прибайкальском районе Республики Бурятия, на восточном побережье оз. Байкал, в центральной части Морского хребта (52°30'–52°50' с.ш., 107°20'–108°00' в.д.). Его территория примыкает к озеру, протяженность береговой линии составляет около 30 км. Общая площадь заказника – 72 524 га, из которых 93 % покрыто лесами. В структуру заказника входит охранный зона шириной 3 км (22 657 га), выполняющая функцию буфера между охраняемыми и хозяйственными территориями.

Согласно лесорастительному районированию, исследуемая территория относится к Восточно-Прибайкальской провинции и характеризуется преобладанием горно-таежных светлохвойных лесов (сосновых и лиственничных) на высотах 550–1200 м над ур. м. Исследуемая территория в пределах Кикинского лесничества представлена сосновыми лесами, с древостоями III, IV класса бонитета, с примесью лиственницы, березы, осины.

Климат заказника резко континентальный, но смягченный влиянием оз. Байкал, с выраженными суточными и сезонными колебаниями температур. Среднегодовая температура составляет -1,5 °С. Зимы относительно мягкие, с температурами до -20 °С и обильными снегопадами (высота снежного покрова в горах достигает 1,2 м). Лето прохладное (+14–16 °С), с частыми осадками, годовая сумма которых составляет 400–600 мм, с максимумом в июле – августе. Гидрологическая сеть заказника представлена реками и ручьями лесного и горного типов, а также тремя крупными озерами (Колок, Большое и Малое Духовое) общей площадью 550 га, имеющими важное рекреационное и экологическое значение. Основные лесобразующие породы – сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), лиственница

сибирская (*Larix sibirica*), ель и кедр (2–6 % насаждений).

В исследуемых лесных фитоценозах выделяются следующие элементы. Подрост представлен молодым поколением основных древесных пород (сосна обыкновенная, лиственница сибирская, береза и осина). В подлеске встречаются рододендрон даурский и шиповник иглистый. Живой напочвенный покров сформирован преимущественно злаковыми, реже бобовыми травами, а в понижениях рельефа – галофитными лугами и зарослями ивы. На территории исследований распространены разнотравные и рододендроновые сосняки на бурых лесных (буроземных) почвах, характеризующихся высокой каменистостью (обилием грубообломочного материала).

Наибольший ущерб экосистемам заказника наносят лесные пожары. В зависимости от типа пожара (низовой, верховой или подземный) повреждаются лесная подстилка, подрост, кроны деревьев или торфяной слой. За 2013–2024 гг. на территории зафиксировано 25 пожаров, причем наиболее катастрофическим оказался 2015 г., когда огнем было пройдено более 43 тыс. га. Основной причиной возгораний (13 случаев) стали грозы.

Полевые измерения проводились на пробных площадях (ПП) размером 30×30 м, на которых изучались различные компоненты биогеоценоза: древостой, подрост, травянистый покров, подстилка и почва по общепринятым в почвоведении и лесоводстве методам. Для почвенных исследований на каждой площадке закладывали четыре прикопки и опорный разрез, где на каждых 10 см определяли плотность и отбирали пробы. Дендрологические исследования включали отбор кернов (с помощью бурава Naglöf) и образцов листьев, ветвей и коры с пяти-семи деревьев каждой породы. Также учитывались сухостой и валеж. Подготовку образцов фитомассы (высушивание, просеивание, взвешивание) проводили в лабораторных условиях. Во всех образцах определяли содержание углерода и азота на автоматическом CHNS-анализаторе (Perkin Elmer) в лаборатории биохимии почв ИОЭБ СО РАН. Образцы лесной подстилки с ПП отбирались посредством наложения деревянной рамки размером 25х25 см в 10-кратной повторности. Для определения массы корней травянистой растительности и кустарничков использовали метод монолитов. Углерод-

ный бюджет на ПП изучен по биопродуктивности. Массу и прирост органического вещества древесных растений определяли методом модельных деревьев [11, 12]. Проанализировано по 10 модельных деревьев на каждой пробной площади. Массу стволов сухостоя, валежа вычисляли по их объему и базисной плотности древесины. Содержание углерода в древесных растениях вычисляли на основании полученных авторами данных фитомассы и концентрации углерода в отдельных ее фракциях.

Результаты исследования и их обсуждение

Структура и динамика живого напочвенного покрова и естественного лесовосстановления на гарях детерминированы временем, прошедшим после пожара, интенсивностью воздействия огня на почвенно-растительный комплекс, а также исходным типом леса. В рамках исследования заложены пять пробных площадей (ПП), отражающих градиент пирогенного воздействия: ПП-1 и ПП-2 представляют последствия одного обширного пожара 2015 г. в разных условиях: на ПП-1 (сосняк разнотравно-осоковый) зафиксированы последствия высокоинтенсивного низового пожара, тогда как на ПП-2 (лиственнично-сосновый разнотравный лес) воздействие было слабоинтенсивным. ПП-3 (сосняк рододендрово-брусничный) служит контрольным участком с минимальным пирогенным воздействием. ПП-4 (сосняк разнотравно-вейниково-кипрейный) характеризуется повреждениями средней интенсивности. ПП-5 (сосняк вейниково-кипрейный) представляет участок с сильнейшими пожарными повреждениями.

Таксационная характеристика древостоев на исследованных пробных площадях (ПП) представлена в табл. 1. Для сравнения в качестве контроля (ППЗ) взята территория спелого сосняка, не затронутого пожарами в последние десятилетия.

Пробная площадь 1 (ПП-1). Заложена в сосняке разнотравно-осоковом на южном склоне Морского хребта (645 м над ур. м.). Участок подвергся интенсивному устойчивому низовому пожару 4–10 лет назад. Отмечается угнетение естественного возобновления вследствие повторяющихся весенних палов. Травяной ярус (проективное покрытие до 80 %) образован лесостепными видами с участием ксерофитных элементов: *Carex pediformis*, *Calamagrostis langsdorffii* и др.

Таблица 1

Таксационная характеристика пробных площадей Прибайкальского заказника

| № ПП | Тип леса | Формула состава | Возраст, лет | Средний диаметр, см | Средняя высота, м | Густота, шт./га | Класс бонитета | Полнота | Запас, м³/га |
|------|---|-----------------|------------------------|---------------------|-------------------|-----------------|----------------|---------|--------------|
| 1 | Сосняк разнотравно-осоковый | 9С1Л+Б+Ос | 50–70 | 15,0 | 14,7 | 850 | III–IV | 0,6 | 105 |
| 2 | Листоветочнично-сосновый разнотравный | 7С3Л+Б+Ос | 60–80 (С) 40–60 (Л) | 21,0 | 15,2 | 650 | II–III | 0,7 | 166 |
| 3 | Сосняк рододендрово-брусничный (контроль) | 7С2Л+Б | 80–100 | 25,0 | 17,0 | 720 | I–II | 0,8 | 262 |
| 4 | Сосняк разнотравно-вейниково-кипрейный | 8С1Л1Б+Ос | 60–80 | 20,0 | 16,0 | 780 | II–III | 0,75 | 209 |
| 5 | Сосняк вейниково-кипрейный | 10С+Ос+Б | 40–50 4–5 (подрост) | 17,0 | 11,0 | 400 | IV–V | 0,4 | 84 |

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования

Пробная площадь 2 (ПП-2). Расположена в листоветочнично-сосновом разнотравном лесу с участием *Betula* sp. на склонах юго-западной экспозиции (665–700 м над ур. м.). После низового пожара слабой интенсивности сохранился разновозрастный древостой. Напочвенный покров разрежен, представлен ксеромезофитным комплексом (*Vicia venosa*, *Sanguisorba officinalis* и др.) на фоне мощного слоя хвойного опада.

Пробная площадь 3 (ПП-3, контроль). Заложена в сосняке рододендрово-брусничном (юго-восточная экспозиция, 682 м над ур. м.) с высокосомакнутым древостоем. Подлесок образован *Rhododendron dauricum* с единичными *Rosa acicularis*. В зависимости от давности локальных пожаров проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса (мезофитный комплекс: *Carex macroura*, *Maianthemum bifolium* и др.) варьирует от 30 до 70%, что также обуславливает значительную изменчивость в количестве подраста сосны и доминантах травостоя.

Пробная площадь 4 (ПП-4). Сосняк разнотравно-вейниково-кипрейный с выраженными повреждениями средней интенсивности. Наблюдается мозаичное прогорание почвы. Проективное покрытие травяного яруса составляет 40–60% с доминированием *Chamerion angustifolium* и *Calamagrostis langsdorffii*.

Пробная площадь 5 (ПП-5). Сосняк вейниково-кипрейный (северо-восточная экспозиция, 635 м над ур. м.) с сильнейшими пожарными повреждениями. Гибель 95–100% древостоя, полное выгорание подстилки и верхнего органического горизонта почвы. Оставшийся древостой представляет собой сухостой. После пожара 2015 г. участок находится на стадии кипрейного восстановления (покрытие ~50%) с микрогруппировками *Polytrichum* spp. и *Calamagrostis langsdorffii* на фоне обильного валежа.

Содержание углерода в компонентах фитомассы

В настоящее время оценка углеродных запасов часто опирается на использование усредненных коэффициентов (например, 50% для древесины, 45% для листвы) [8]. Однако данные настоящего исследования выявили значительную вариабельность концентрации углерода в растительных тканях – от 32,64±0,16 до 57,37±0,29% (табл. 2). Эта вариативность обусловлена видовой принадлежностью, типом тканей и экологическими условиями. Применение обобщенных коэффициентов может приводить к погрешности оценок до 10%, что подтверждает необходимость перехода к видово- и тканеспецифичным коэффициентам для повышения точности регионального и глобального мониторинга углерода.

Среднее содержание углерода по всем исследованным породам в лесных экосистемах Прибайкальского заказника составило 47,96%. Наибольшие значения отмечены у сосны (48,66%), наименьшие – у березы (47,20%). Различия между основными древесными породами статистически невелики, что характерно для таежных видов. Общий диапазон содержания углерода в абсолютно сухом веществе составил $42,38 \pm 0,21$ – $57,37 \pm 0,29\%$, что согласуется с литературными данными: в среднем 45–53% [13], 42–53% для таежных хвойных [14] и 39–51% для лесов Республики Коми [15].

Выявлены следующие закономерности распределения углерода в растительных тканях. Кора показала максимальные значения концентрации углерода, особенно у березы – до 57,37% (ПП-1). Это объясняется

высоким содержанием углеродоемких и химически устойчивых соединений: лигнина, суберина и фенольных веществ, выполняющих защитную функцию. У хвойных пород кора также обогащена смолами и фенолами.

Ветви характеризуются широким диапазоном содержания углерода (48,04–56,78%), демонстрируя высокие значения. Это связано с преобладанием лигнифицированных механических и проводящих тканей. Концентрация углерода зависит от возраста и физиологического состояния ветви: молодые растущие побеги активно синтезируют целлюлозу, а зрелые – накапливают лигнин. Аномально высокое значение на ПП-5 (56,78% у сосны) может быть результатом компенсаторного роста и усиленного синтеза структурных полимеров после пирогенного повреждения.

Таблица 2

Содержание органического углерода (%) в компонентах фитомассы на пробных площадях Прибайкальского заказника

| Компоненты фитомассы | ПП-1 | ПП-2 | ПП-3 | ПП-4 | ПП-5 |
|----------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Сосна | | | | | |
| Древесина | $48,30 \pm 0,24$ | $48,97 \pm 0,24$ | $49,55 \pm 0,25$ | $47,62 \pm 0,24$ | $48,85 \pm 0,24$ |
| Кора | $53,66 \pm 0,27$ | $52,02 \pm 0,26$ | $49,35 \pm 0,25$ | $51,14 \pm 0,26$ | $53,91 \pm 0,27$ |
| Ветви | – | $51,67 \pm 0,26$ | $53,45 \pm 0,27$ | $51,91 \pm 0,26$ | $56,78 \pm 0,28$ |
| Хвоя | – | $48,96 \pm 0,24$ | $49,96 \pm 0,25$ | $51,31 \pm 0,26$ | $49,62 \pm 0,25$ |
| Лиственница | | | | | |
| Древесина | $46,55 \pm 0,23$ | $47,22 \pm 0,24$ | $49,17 \pm 0,25$ | $47,13 \pm 0,24$ | $47,84 \pm 0,24$ |
| Кора | – | – | – | $49,89 \pm 0,25$ | – |
| Ветви | $52,47 \pm 0,26$ | $50,72 \pm 0,25$ | $48,47 \pm 0,24$ | $50,68 \pm 0,25$ | $53,03 \pm 0,27$ |
| Хвоя | $46,65 \pm 0,23$ | $47,27 \pm 0,24$ | $47,89 \pm 0,24$ | $47,22 \pm 0,24$ | $45,49 \pm 0,23$ |
| Береза | | | | | |
| Древесина | $46,09 \pm 0,23$ | $49,61 \pm 0,25$ | $46,80 \pm 0,23$ | $46,53 \pm 0,23$ | $46,96 \pm 0,23$ |
| Кора | $57,37 \pm 0,29$ | $55,12 \pm 0,27$ | $56,29 \pm 0,28$ | $54,64 \pm 0,27$ | $50,18 \pm 0,25$ |
| Ветви | $53,33 \pm 0,27$ | $50,89 \pm 0,25$ | $51,55 \pm 0,26$ | $50,13 \pm 0,25$ | $52,30 \pm 0,26$ |
| Листья | $47,96 \pm 0,24$ | $48,01 \pm 0,24$ | $42,38 \pm 0,21$ | $47,38 \pm 0,24$ | $48,85 \pm 0,24$ |
| Осина | | | | | |
| Древесина | $48,19 \pm 0,24$ | $49,32 \pm 0,25$ | – | $48,12 \pm 0,24$ | $48,02 \pm 0,24$ |
| Кора | $46,25 \pm 0,23$ | $47,38 \pm 0,24$ | – | $47,58 \pm 0,24$ | $46,71 \pm 0,23$ |
| Ветви | $48,04 \pm 0,24$ | $50,58 \pm 0,25$ | – | $49,54 \pm 0,25$ | $49,65 \pm 0,25$ |
| Листья | $46,98 \pm 0,23$ | $47,24 \pm 0,24$ | – | $46,87 \pm 0,23$ | $46,45 \pm 0,23$ |
| Травянистые растения | | | | | |
| Надземная часть | $42,96 \pm 0,21$ | $43,40 \pm 0,22$ | $44,79 \pm 0,22$ | $47,07 \pm 0,24$ | $43,32 \pm 0,22$ |
| Подземная часть | $32,64 \pm 0,16$ | $41,90 \pm 0,21$ | $47,48 \pm 0,24$ | $41,88 \pm 0,21$ | $36,35 \pm 0,18$ |
| Опад (смешанный) | $41,28 \pm 0,21$ | $41,98 \pm 0,21$ | $46,91 \pm 0,23$ | $45,91 \pm 0,23$ | $43,32 \pm 0,22$ |

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования

Древесина обладает стабильно более низким содержанием углерода (46–49% в среднем), что соответствует составу лигно-целлюлозного комплекса, где доля углеводов (целлюлоза, гемицеллюлоза) выше. Хвойные породы (особенно сосна, до 49,55%) в среднем превосходят лиственные (береза – 46,09%) по этому показателю, что обусловлено большей долей смол и лигнина. Осина характеризуется наименьшими значениями во всех тканях – вероятно, из-за более рыхлой структуры и повышенной зольности. Листья/хвоя содержат 45–51% углерода. Фотосинтетические ткани накапливают углеводы, а у хвойных – также терпены и смолы. Относительно более низкие значения по сравнению с древесиной связаны с высоким содержанием воды, пигментов и зольных элементов. Травянистые растения имеют сравнительно низкое содержание углерода: в надземных частях 42,96–47,07%, в корнях 32,64–47,48%. Это объясняется слабой степенью одревеснения, высокой зольностью и, для корней, повышенным содержанием минеральных веществ. Опад демонстрирует вариабельность (41,28–46,91%), отражающую его гетерогенный состав (частично разложившиеся остатки). На горях содержание углерода в опаде может возрастать за счет включения обугленных фрагментов.

Запасы углерода по компонентам фитомассы

Углеродный бюджет древостоев в исследованных насаждениях Прибайкальского заказника существенно варьирует в зависимости от типа леса, возраста древостоя и интенсивности пирогенного воздействия. Во всех пробных площадях доминирующим компонентом, формирующим 73–75% общего пула углерода, является стволовая древесина, что подтверждает ее ключевую роль в долгосрочной секвестрации углерода.

Общие запасы углерода в древесном ярусе достигают максимума на контрольном участке ПП-3 (48,68 т С/га) и минимума на сильно нарушенном участке ПП-5 (15,39 т С/га). Такое распределение типично для спелых древостоев, где основная биомасса сосредоточена в стволах. Сходные закономерности отмечают [12], указывая, что у светолубивой сосны, хорошо очищающейся от сучьев, углерод в основном аккумулируется в стволах и корнях, тогда как вклад крон незначителен.

Ветви и хвоя (листва) образуют второстепенные углеродные пулы: их вклад составляет 12–14 и 4–7% соответственно от запаса древесины. Количественные значения этих фракций коррелируют с запа-

сом древесины, что соответствует биологическим закономерностям роста. Доля углерода, связанного в надземной фитомассе, последовательно возрастает от менее продуктивного сосняка вейниково-кипрейного к более продуктивному сосняку рододендрово-брусничному. Такое распределение обусловлено общей динамикой биопродуктивности древостоев в различных экологических условиях под влиянием пожаров. На ненарушенном участке ПП-3 более интенсивные физиологические процессы способствуют формированию более мощного скелетного блока (ствол, ветви) по отношению к фотосинтезирующему аппарату (хвоя). Доля стволовой коры в общем пуле надземной фитомассы имеет тенденцию к снижению от наиболее нарушенных сосняков (вейниково-кипрейного, разнотравно-осокового) к менее затронутому огнем сосняку рододендрово-брусничному.

Следующим по значимости компонентом является лесная подстилка (опад), составляющая 15–24% общего запаса углерода. Наибольшее ее количество зафиксировано на ПП-3 (11,52 т С/га), наименьшее – на ПП-2 (5,45 т С/га), что отражает различную интенсивность процессов накопления и разложения органического вещества. Валеж зарегистрирован только на участке ПП-5, где его запас составил 4,9 т С/га (около 15% общего пула). Его наличие – прямое следствие недавнего массового отмирания деревьев после интенсивного пожара.

Сравнительный анализ пробных площадей показывает, что с улучшением экологических условий и снижением пирогенной нагрузки общие запасы углерода в компонентах надземной фитомассы возрастают. ПП-3 выделяется максимальными общими запасами (76,93 т С/га), что отражает высокую продуктивность, зрелость и ненарушенность лесной экосистемы. ПП-5, подвергшийся сильной пирогенной трансформации, имеет минимальный показатель (32,85 т С/га), что обусловлено низковозрастной структурой сохранившегося древостоя и значительной долей валежа. ПП-2 (лиственнично-сосновый лес) демонстрирует аномально низкий запас подстилки при высокой биомассе древесины, что может свидетельствовать об ускоренной минерализации опада в данных условиях.

Общая структура углеродных пулов на исследованной территории характеризуется выраженным доминированием стволовой древесины (около 60%), значительной долей подстилки (около 17%) и суммарным вкладом надземных частей кроны (кора,

ветви, листва) порядка 20%. Валеж, присутствующий локально, является важным, хотя и менее массивным компонентом, играющим ключевую экологическую роль в процессах сукцессии и круговорота веществ после нарушений. Значительная доля подстилки подчеркивает важность почвенных процессов и деструкции в функционировании данных лесных экосистем.

Выводы

Проведенное исследование позволило количественно оценить запасы углерода в светлосвойных лесах Прибайкальского заказника, находящихся на разных стадиях постпирогенного восстановления. Сформулированы следующие основные выводы:

1. Содержание углерода в фитомассе варьирует в широком диапазоне (32,6–57,4%) и зависит от вида растения и типа ткани. Использование усредненного коэффициента (50%) может приводить к значительной погрешности, что подтверждает необходимость применения региональных уточненных значений.

2. Интенсивность пожара кардинально влияет на величину углеродного пула. Общий запас углерода на горях с катастрофическими повреждениями (32,9 т С/га) более чем вдвое ниже, чем в ненарушенных спелых сосняках (76,9 т С/га). Основные потери приходится на стволовую древесину.

3. Структура углеродного бюджета после пожара меняется: снижается доля долгоживущей древесной биомассы и возрастает роль валежа, подстилки и травянистого покрова. Даже через 8–10 лет сильно нарушенные экосистемы не восстанавливают исходный запас углерода.

4. Динамика восстановления определяется не только временем, прошедшим после пожара, но и его интенсивностью, а также исходным типом леса. Это требует дифференцированного подхода к оценке последствий возгораний.

Практическая значимость работы заключается в получении оригинальных данных для повышения точности региональных и национальных кадастров углерода. Результаты подчеркивают ключевую роль сохранения спелых лесов и необходимость учета интенсивности пожара при оценке углеродного

баланса и планировании восстановительных мероприятий в Байкальском регионе.

Список литературы

1. Cerny J., Pokorny R., Vejputskova M., Sramek V., Bednar P. Air Temperature Is the Main Driving Factor of Radiation Use Efficiency and Carbon Storage of Mature Norway Spruce Stands under Global Climate Change // *International Journal of Biometeorology*. 2020. Vol. 64. Is. 9. P. 1599–1611. DOI: 10.1007/s00484-020-01941-w.
2. Clason A.J., Farnell I., Lilles E.B. Carbon 5–60 Years After Fire: Planting Trees Does Not Compensate for Losses in Dead Wood Stores // *Frontiers in Forests and Global Change*. 2022. Vol. 5–2022. DOI: 10.3389/ffgc.2022.868024.
3. Dar J.A., Sundarapandian S. Variation of Biomass and Carbon Pools with Forest Type in Temperate Forests of Kashmir Himalaya, India // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2015. Vol. 187. Is. 2. DOI: 10.1007/s10661-015-4299-7.
4. Schepaschenko D., Moltchanova E., Fedorov S. et al. Russian forest sequesters substantially more carbon than previously reported // *Sci Rep*. 2021. Vol. 11. 12825. DOI: 10.1038/s41598-021-92152-9.
5. Bousquet E., Mialon A., Rodriguez-Fernandez N. et al. Monitoring post-fire recovery of various vegetation biomes using multi-wavelength satellite remote sensing // *Biogeosciences*. 2022. T. 19. № 13. P. 3317–3336. DOI: 10.5194/bg-19-3317-2022.
6. Di Sacco A., Hardwick K.A., Blakesley D. et al. Ten golden rules for reforestation to optimize carbon sequestration, biodiversity recovery and livelihood benefits // *Global Change Biology*. 2021. T. 27. № 7. P. 1328–1348. DOI: 10.1111/gcb.15498.
7. Powers E.M., Marshall J.D., Zhang J., Wei L. Post-fire management regimes affect carbon sequestration and storage in a Sierra Nevada mixed conifer forest // *Forest Ecology and Management*. 2013. T. 291. P. 268–277. DOI: 10.1016/j.foreco.2012.07.038.
8. Ma S., He F., Tian D. et al. Variations and determinants of carbon content in plants: a global synthesis // *Biogeosciences*. 2018. T. 15. № 3. P. 693–702. DOI: 10.5194/bg-15-693-2018.
9. Наквасина Е.Н., Шумилова Ю.Н. Динамика запасов углерода при формировании лесов на постагrogenных землях // *Известия вузов. Лесной журнал*. 2021. № 1. С. 46–59. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-46-59.
10. Khan A., Zhang X., Zhang K., Iqbal A., Ahmad A., Saeed S., Hayat M., Yang X. Tree Distribution Pattern, Growing Stock Characteristics and Biomass Carbon Density of Mongolian Scots pine (*Pinus Sylvestris* var *Mongolica*) Plantation of Horqin Sandy Land, China // *Pakistan Journal of Botany*. 2020. Vol. 52. Is. 3. P. 995–1002. DOI: 10.30848/PJB2020-3(26).
11. Усольцев В.А., Залесов С.В. Методы определения биологической продуктивности насаждений. Екатеринбург: Уральский лесотехнический университет, 2005. 147 с. ISBN 5-94984-049-6.
12. Уткин А.И. Биологическая продуктивность лесов (методы изучения и результаты) // *Лесоведение и лесоводство. Итоги науки и техники*. М.: ВИНТИ. 1975. С. 9–189.
13. Zmolodchikov D.G., Grabovskii V.I., Kraev G.N. A twenty-year retrospective on the forest carbon dynamics in Russia // *Contemporary Problems of Ecology*. 2011. Vol. 4. Is. 7. P. 706–715. DOI: 10.1134/S1995425511070022.
14. Бобкова К.С., Тужилкина В.В. Содержание углерода и калорийность органического вещества в лесных экосистемах Севера // *Экология*. 2001. № 1. С. 69–74. ISSN 0367-0597.
15. Пристова Т.А., Загирова С.В., Манов А.В. Продукция органического вещества и аккумуляция углерода в напочвенном покрове еловых и березовых фитоценозов в предгорьях Приполярного Урала // *Теоретическая и прикладная экология*. 2018. № 2. С. 53–61. DOI: 10.25750/1995-4301-2018-2-053/2-061.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Исследования выполнены при поддержке гранта РНФ № 24-24-20098 (<https://rscf.ru/project/24-24-20098/>).

Financing: The research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 24-24-20098 (<https://rscf.ru/project/24-24-20098/>).