



ИД «Академия Естествознания»

УСПЕХИ СОВРЕМЕННОГО ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

Научный журнал

№ 4 2026



ADVANCES IN CURRENT NATURAL SCIENCES

Scientific journal

No. 4 2026



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 от 16.10.2015.

«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.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.с.-х.н., проф. *Данилин И. М.* (Красноярск); 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.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.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.т.н., проф. *Мусаев В. К.* (Москва); д.с.-х.н. *Никитин С. Н.* (Ульяновск); 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.т.н., доцент *Ульрих Е. В.* (Кемерово); д.ф.-м.н., проф. *Ширанов Д. Ш.* (Улан-Удэ); 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	30.04.2026	Дата выхода номера	29.05.2026
Формат	60x90 1/8	Усл. печ. л.	14
Тираж	1000 экз.	Заказ	УСЕ 2026/4

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 dated October 16, 2015.

«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., 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. *Danilin I.M.* (Krasnoyarsk); D.Sc., Prof. *Dresvyannikov A.F.* (Kazan); D.Sc., Prof. *Zalesov S.V.* (Ekaterinburg); D.Sc., Docent *Zakharchenko A.V.* (Tyumen); D.Sc., Docent *Kopylov I.S.* (Perm); D.Sc., Prof. *Kostylev P.I.* (Zernograd); D.Sc. *Kotsareva N.V.* (Belgorod); 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., Prof. *Musaev V.K.* (Moscow); D.Sc. *Nikitin S.N.* (Ulyanovsk); D.Sc., Docent *Sokol'skaya 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., Docent *Ulrich E.V.* (Kemerovo); D.Sc., Prof. *Shirapov D.Sh.* (Ulan-Ude); 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
Signed for print	30.04.2026
Format	60x90 1/8
Circulation	1000 copies
Telephone	+7 (499) 705-72-30
Number issue date	29.05.2026
Conditionally printed sheets	14
Order	YCE 2026/4

Distribution at a free price

© LLC PH Academy of Natural History

СОДЕРЖАНИЕ

Географические науки (1.6.8, 1.6.12, 1.6.13, 1.6.21)

СТАТЬИ

АНАЛИЗ ПРОЯВЛЕНИЙ ПРИРОДНО И АНТРОПОГЕННО ОБУСЛОВЛЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ДИНАМИКИ СОСТОЯНИЙ ПРИ СМЕНЕ ИНВАРИАНТОВ ЛАНДШАФТНЫХ КОМПЛЕКСОВ <i>Алексеев И. А.</i>	8
ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА И ОПТИМИЗАЦИЯ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ СТЕПНЫХ АГРОЛАНДШАФТОВ В УСЛОВИЯХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ И АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКИ <i>Гринцов Д. А., Нестеренко М. Ю., Соломатин Н. В.</i>	15
ДИНАМИКА РАЗВИТИЯ ВОДНОЙ ЭРОЗИИ ПОЧВ В УСЛОВИЯХ МЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА ПРИ РАЗНОМ СОСТОЯНИИ АГРОФОНА <i>Евсеева Н. С., Квасникова З. Н., Каширо М. А., Петров А. И., Хон А. В., Зайцева В. Ю., Оленникова А. В.</i>	21
ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ФАКТОРОВ РАЗМЕЩЕНИЯ УЧРЕЖДЕНИЙ СТАЦИОНАРНОЙ РЕКРЕАЦИИ НИЖЕГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ НА ОСНОВЕ ЛАНДШАФТНОГО ПОДХОДА <i>Зайцева Ю. В., Асташин А. Е., Зайцев Л. А.</i>	27
РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ПРОЦЕССОВ ХОЗЯЙСТВЕННОГО ОСВОЕНИЯ ГЕОСИСТЕМ В СТРУКТУРЕ РЕГИОНАЛЬНОГО ГЕОПОРТАЛА <i>Мучкаева Н. С.</i>	35
РЕЗУЛЬТАТЫ АЭРОПАЛИНОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ГОРОДА БАРНАУЛА ЗА 2025 ГОД <i>Стребкова А. С., Ненашева Г. И., Карманова М. В.</i>	42

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

К ВОПРОСУ ОБ ИССЛЕДОВАНИИ СТРОЕНИЯ ОСАДОЧНОГО РАЗРЕЗА МЕТОДОМ ЦЕПЕЙ МАРКОВА НА ПРИМЕРЕ НИЖНЕКАЗАНСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ ЮГО-ВОСТОКА РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН <i>Нургалиева Н. Г., Фахрутдинов Э. И.</i>	50
ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ РТУТИ В ПРОДУКТАХ РЫБОЛОВСТВА НА КАЧЕСТВО И БЕЗОПАСНОСТЬ РЫБНОЙ ПРОДУКЦИИ (НА ПРИМЕРЕ ПРИРОДНЫХ ВОДОЕМОВ АЛТАЯ) <i>Осипова Н. А., Шорохова М. Г., Шкригун А. А., Торопов А. В.</i>	56

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОНИЦАЕМОСТИ ЗЕМНОЙ КОРЫ АПАЧИНСКОЙ
ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ (КАМЧАТКА)

Сидоров М. Д.62

МИНЕРАЛОГИЯ ЗОЛОТОРУДНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ МЕСТОРОЖДЕНИЯ
ШАХТНОЕ (ЦЕНТРАЛЬНО-КОЛЫМСКИЙ РЕГИОН)

Чепурнов И. А., Грановская Н. В.78

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

МЕСТОРОЖДЕНИЯ НИКЕЛЯ: РАСПРОСТРАНЕНИЕ, ЗАПАСЫ
И ПРОБЛЕМЫ ОСВОЕНИЯ

Ларионова Т. И., Бородина Д. С.85

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

СТАТЬЯ

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБСЛЕДОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ
ДЕГРАДИРОВАВШИХ БЕСХОЗНЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ
СООРУЖЕНИЙ САРАКТАШСКОГО РАЙОНА ОРЕНБУРГСКОЙ ОБЛАСТИ

Качаев А. Е., Лесников И. Р., Турапин С. С.96

Физико-математические науки (1.6.22)

СТАТЬЯ

СОЗДАНИЕ ПЛАНОВО-ВЫСОТНОЙ ОСНОВЫ ДЛЯ РЕКОНСТРУКЦИИ
МОСТА НА ТЕРРИТОРИИ СЕЛЬСКОГО ПОСЕЛЕНИЯ ЛЕРМОНТОВО
В ТУАПСИНСКОМ РАЙОНЕ

Солодунов А. А., Пишдаток С. К., Гайтян Е. А.104

CONTENTS

Geographical sciences (1.6.8, 1.6.12, 1.6.13, 1.6.21)

ARTICLES

ANALYSIS OF THE MANIFESTATIONS OF NATURALLY AND ANTHROPOGENICALLY CONDITIONED PROCESSES OF STATE DYNAMICS DURING THE CHANGE OF LANDSCAPE COMPLEX INVARIANTS <i>Alekseev I. A.</i>	8
GEOECOLOGICAL ASSESSMENT AND OPTIMIZATION OF LAND USE IN STEPPE AGROLANDSCAPES UNDER CLIMATE CHANGE AND ANTHROPOGENIC LOAD <i>Grintzov D. A., Nesterenko M. Yu., Solomatin N. V.</i>	15
DYNAMICS OF DEVELOPMENT OF WATER SOIL EROSION IN CONDITIONS OF A CHANGING CLIMATE WITH DIFFERENT STATES OF THE AGRICULTURAL BACKGROUND <i>Eyseeva N. S., Kvasnikova Z. N., Kashiro M. A., Petrov A. I., Khon A. V., Zaitseva V. Yu., Olennikova A. V.</i>	21
SPATIAL ANALYSIS OF THE FACTORS OF THE LOCATION OF INPATIENT RECREATION FACILITIES IN THE NIZHNY NOVGOROD REGION BASED ON THE LANDSCAPE APPROACH <i>Zaitseva Yu. V., Astashin A. E., Zaitsev L. A.</i>	27
DEVELOPMENT OF ALGORITHMS FOR GEOECOLOGICAL ASSESSMENT OF PROCESSES OF ECONOMIC DEVELOPMENT OF GEOSYSTEMS IN THE STRUCTURE OF A REGIONAL GEOPORTHAL <i>Muchkaeva N. S.</i>	35
THE RESULTS OF AEROPALINOLOGICAL MONITORING OF BARNAUL IN 2025 <i>Strebkova A. S., Nenasheva G. I., Karmanova M. V.</i>	42

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

ON THE STUDY OF THE SEDIMENTARY SECTION STRUCTURE USING THE MARKOV CHAINS METHOD: A CASE STUDY OF THE LOWER KAZANIAN DEPOSITS IN THE SOUTHEAST OF THE REPUBLIC OF TATARSTAN <i>Nourgalieva N. G., Fakhrutdinov E. I.</i>	50
THE IMPACT OF MERCURY CONTENT IN FISHING PRODUCTS ON THE QUALITY AND SAFETY OF FISH PRODUCTS (ON THE EXAMPLE OF NATURAL WATERBODIES IN ALTAI) <i>Osipova N. A., Shorokhova M. G., Shkrigun A. A., Toropov A. V.</i>	56

STUDY OF CRUSTAL PERMEABILITY OF THE APACHINSKAYA
GEOHERMAL SYSTEM (KAMCHATKA)

Sidorov M. D.62

MINERALOGY OF GOLD ORE FORMATIONS OF THE SHAKHTNOE
DEPOSIT (CENTRAL KOLYMA REGION)

Chepurinov I. A., Granovskaya N. V.78

REVIEW

NICKEL DEPOSITS: DISTRIBUTION, RESERVES, AND DEVELOPMENT
PROBLEMS

Larionova T. I., Borodina D. S.85

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

ARTICLE

RESULTS OF SURVEY OF THE TECHNICAL CONDITION OF DEGRADED
ORPHANAGED HYDRAULIC STRUCTURES IN THE SARAKTASH
DISTRICT OF THE ORENBURG REGION

Kachaev A. E., Lesnikov I. R., Turapin S. S.96

Physical and mathematical sciences (1.6.22)

ARTICLE

CREATION OF A PLANNED HIGH-RISE BASE FOR THE RECONSTRUCTION
OF THE BRIDGE IN THE TERRITORY OF THE RURAL SETTLEMENT
OF LERMONTOVO IN THE TUAPSE REGION

Solodunov A. A., Pshidatok C. K., Gaytyan E. A.104



АНАЛИЗ ПРОЯВЛЕНИЙ ПРИРОДНО И АНТРОПОГЕННО ОБУСЛОВЛЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ДИНАМИКИ СОСТОЯНИЙ ПРИ СМЕНЕ ИНВАРИАНТОВ ЛАНДШАФТНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Алексеев И. А. ORCID ID 0009-0003-3501-1834

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт географии
имени В. Б. Сочавы Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Российская Федерация;
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Благовещенский государственный педагогический университет», Благовещенск,
Российская Федерация, e-mail: igoralex20071@mail.ru*

Целью работы является анализ природно и антропогенно обусловленных процессов динамики, переменных состояний внутриландшафтных комплексов и сопряженного с ними формирования трансформированного исходного типа инварианта или полную смену инвариантов ландшафтных систем. Рассмотрены теоретические, концептуальные подходы к анализу на топологическом уровне проявлений взаимосвязей процессов динамики состояний (автовосстановления, деградации, деструкции, элиминации, квазистабильности) внутриландшафтных комплексов и сохранения близкого к квазистабильному формирования трансформированного исходного или коренным образом преобразованного типов инвариантов ландшафтных комплексов в условиях распространения лесных ландшафтов на территории Дальневосточного федерального округа. Применение классических физико-географических методов стационарных и маршрутных многолетних полевых и дистанционно-полевых покомпонентных, комплексных полевых и дистанционных наблюдений морфологии природных, природно-антропогенных и антропогенных ландшафтов послужило основой для проведения достоверного установления взаимосвязей процессов сохранения и смены инвариантов элементарных внутриландшафтных комплексов (топогеосистем) с формированием и результатами процессов автовосстановления, деградации, деструкции и элиминации элементов, компонентов ландшафтов. Камеральные дешифровка и интерпретация, классификация и статистическая обработка материалов дистанционного наблюдения морфологических изменений структуры ландшафтных комплексов основаны на их сопоставлении с результатами полевых первичных наблюдений. Материалы исследования вносят вклад в решение теоретико-концептуальных проблем ландшафтного морфологического анализа, способствуют развитию методологических основ для исследования процессов динамики квазистабильных и переменных состояний ландшафтов, способствуют организации и проведению дальнейших исследований в области анализа морфологии и динамики структуры, параметров компонентов ландшафтов для их дальнейшего учета при формировании систем рационального природопользования.

Ключевые слова: инвариант ландшафтного комплекса, автовосстановление, деградация, деструкция, элиминация структуры, компонентов ландшафтных комплексов

ANALYSIS OF THE MANIFESTATIONS OF NATURALLY AND ANTHROPOGENICALLY CONDITIONED PROCESSES OF STATE DYNAMICS DURING THE CHANGE OF LANDSCAPE COMPLEX INVARIANTS

Alekseev I. A. ORCID ID 0009-0003-3501-1834

*Federal State Budgetary Institution of Science V. B. Sochava Institute of Geography
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation;
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Blagoveschensk State
Pedagogical University", Blagoveschensk, Russian Federation, e-mail: igoralex20071@mail.ru*

The aim of this work is to analyze naturally and anthropogenically induced dynamic processes, variable states of intra-landscape complexes, and the associated formation of a transformed initial invariant type or a complete change in landscape system invariants. This paper examines theoretical and conceptual approaches to analyzing, at the topological level, the manifestations of the interrelations between the processes of dynamic states (auto-restoration, degradation, destruction, elimination, quasi-stability) of intra-landscape complexes and the preservation of a quasi-stable state, the formation of a transformed initial or radically transformed invariant type of landscape complexes in the context of forest landscapes spreading across the Far Eastern Federal District. The application of classical physical-geographical methods of stationary and route-based, long-term field and remote-field, component-by-component, and integrated field and remote observations of the morphology of natural, natural-anthropogenic, and anthropogenic landscapes served as the basis for reliably establishing the relationships between the processes of preservation and change of invariants of elementary intra-landscape complexes (topogeosystems) and the formation and results of processes of self-restoration, degradation, destruction, and elimination of landscape elements and components. Office-based deciphering and interpretation, classification, and statistical processing of remote observation data on morphological changes in the structure of landscape complexes are based on their comparison with the results of primary field observations. The research materials contribute to the solution of theoretical and conceptual problems of landscape morphological analysis, promote the development of methodological foundations for the study of the processes of dynamics of quasi-stable and variable states of landscapes, and facilitate the organization and conduct of further research in the field of analysis of morphology and dynamics of the structure, parameters of landscape components for their further consideration in the formation of systems of rational nature management.

Keywords: landscape complex invariant, auto-restoration, degradation, destruction, elimination of structure, components of landscape complexes

Введение

Оформившаяся во второй половине XX в. и получившая свое активное развитие в начале XXI в. теоретическая концепция динамики геосистем оказала большое влияние на формирование подходов к анализу динамики состояний внутриландшафтных комплексов (преимущественно на уровне элементарной топогеосистемы, ландшафтной фации) [1]. В частности, учением о геосистемах рассматривается динамика их переменных состояний как закономерная, обусловленная природными или антропогенными факторами смена инвариантов их морфотипов, изменения параметров, показателей компонентов геосистем [1–3].

Несмотря на детальную разработку различных аспектов динамических (переменных) и стабильных состояний комплексов, учение о геосистемах, как правило, не рассматривает системную структуру этапов их динамики. Хотя при этом динамика состояний геосистем, ландшафтных комплексов даже логически может быть дифференцирована на поступательное, эволюционное развитие (в том числе и со сменой инвариантов) и стремительное, взрывообразное по скорости протекание процессов изменения параметров компонентов или в целом инварианта геосистем [1–3]. Таким образом, в рамках научного поиска физической географии сформировался значительный пласт требующих детального изучения процессов динамики состояний внутриландшафтных комплексов – от уровня стабильно долговременного сохранения их показателей и свойств до коренной смены инварианта.

Цель исследования – дифференциация и анализ закономерностей и специфики проявлений природно и антропогенно обусловленных процессов динамики состояний при смене или сохранении инвариантов ландшафтных комплексов.

Материалы и методы исследования

Исследование основано на первичном детальном покомпонентном и функционально-комплексном изучении морфологических показателей ландшафтно-биоценотической структуры ключевых площадок территории с различными природными и антропогенными условиями и факторами динамики переменных состояний внутриландшафтных комплексов. Последующий стационарный анализ основан на интерпретации и статическом обобщении периодически получаемых материалов дистанционного наблюдения (с применением материа-

лов, полученных в результате применения возможностей космических орбитальных и беспилотных авиационных средств), характеризующих динамику пространственных (рисунок и геометрические показатели контуров выделов) и качественных показателей морфологии внутриландшафтных комплексов и их компонентов [2; 4; 5]. При этом рассматривались такие состояния, как автовосстановление нарушенной природными и антропогенными факторами структуры, деградация, деструкция и элиминация элементов и компонентов внутриландшафтных комплексов (на уровне ландшафтных фаций, топогеосистем) со статическим выявлением закономерностей и регионально-локальной специфики названных состояний и их результатов.

Результаты исследования и их обсуждение

С учетом специфического предмета анализа процессов динамики (переменных) состояний внутриландшафтных комплексов для долгосрочных наблюдений были выбраны и детально изучены более 10000 пунктов – площадок наблюдений в пределах лесных ландшафтов на территории Дальневосточного федерального округа (ДФО).

Само понятие об инварианте, как о возможном конечном этапе полифакторной эволюции геосистем, сформировано и широко дифференцировано в процессе становления и развития основоположником, В. Б. Сочавой, и представителями иркутской физико-географической школы [1–3].

Выявленные на территории ДФО проявления процессов автовосстановления, деградации, деструкции элементов, компонентов ландшафтных комплексов как основные элементы их циклической динамики зачастую определяют трансформацию (но сохранение) инварианта системы с редкими случаями его смены. Это обстоятельство позволяет утверждать, что не только имеющие деструктивный характер процессы динамики комплексов, но и продуктивные, связанные с автовосстановлением нарушенной природными и (или) антропогенными факторами структуры, в результате своего развития могут определять или трансформацию структуры существующего, или смену типа инварианта ландшафтного комплекса. При этом возможный уровень трансформации структуры с сохранением типа инварианта системы или его сменой может быть различным: от элементарного, топологического до уровня ландшафтов и их групп.

Необходимо также уточнить, что интенсивное развитие процессов автовосстановления на ранних стадиях изменения, нарушения внешними факторами структуры комплекса определяет сохранение его исходного типа инварианта. Наряду с этой особенностью проявляется и влияние типа автовосстановления нарушенной структуры комплекса [4] на восстановление или формирование нового инварианта комплекса и его стабилизацию.

Между тем структурированные в рамках анализа процессов постантропогенного автовосстановления лесных ландшафтов

[4; 6] процессные элементы (стадии и соподчиненные им фазы) также применимы для дифференциации и анализа всех квазистабильных и переменных состояний ландшафтного комплекса. Впрочем, являющиеся основными, стабилизирующими определенным типом состояния (в направлении восстановления или, наоборот, деградации) узловыми центрами переменных состояний и их смены, стадии развития процессов динамики состояний ландшафтных комплексов в конечном итоге определяют сохранение или смену инварианта комплекса (инвариантные стадии процессов динамики [4]).

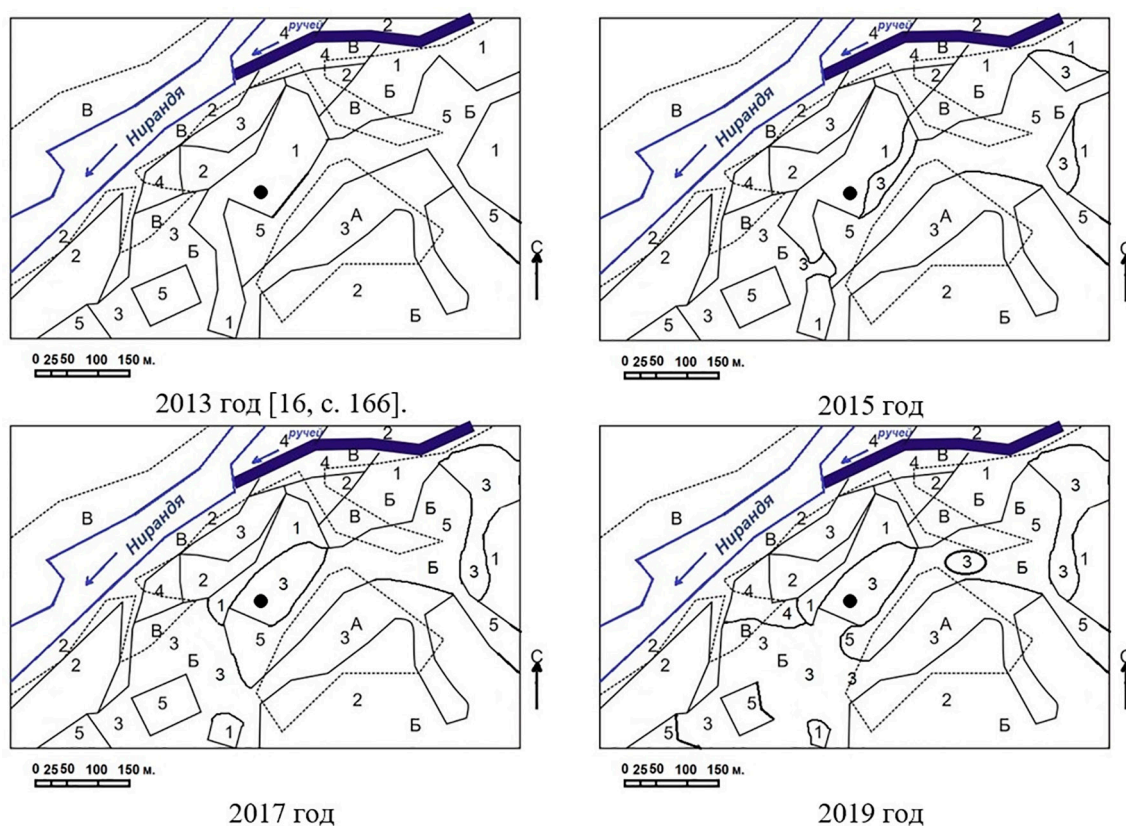


Рис. 1. Карты-схемы проявлений в период с 2013 по 2019 г. динамики антропогенно обусловленных процессов деградации структуры без смены инварианта внутривидовых комплексов аккумулятивных субгоризонтальных и пологоувалистых площадок пойменных и надпойменных террас со среднетаежными светлохвойными комплексами, долинными мелколиственно-кустарниковыми фитоценозами на мерзлотных буртаежных и аллювиальных почвах, маревыми комплексами на мерзлотно-болотных почвах в пределах долины р. Томмот (Нирандя), притока р. Большой Нимныр (Республика Саха (Якутия) (с использованием материалов источника [16])

На карте-схеме индексами обозначены. Урочища: А) котловинообразных понижений флювиального происхождения; Б) выположенных площадок мезоводораздельных возвышенностей (площадки недифференцированных низкой, высокой поймы, I надпойменной террасы); В) долинообразных понижений. Ландшафтные фации (фитоценозы): 1) сосново-лиственнично-можжевелово-багульниково-бруснично-мохово-лишайниковые; 2) лиственнично-березово-багульниково-бруснично-моховые, лиственнично-бруснично-мохово-лишайниковые; 3) березово-моховые; 4) багульниково-бруснично-моховые, бруснично-мохово-лишайниковые; 5. антропогенные

Условные знаки: – границы урочищ; ● – точки позиционной привязки;
 ———— – границы ландшафтных фаций (фитоценозов)

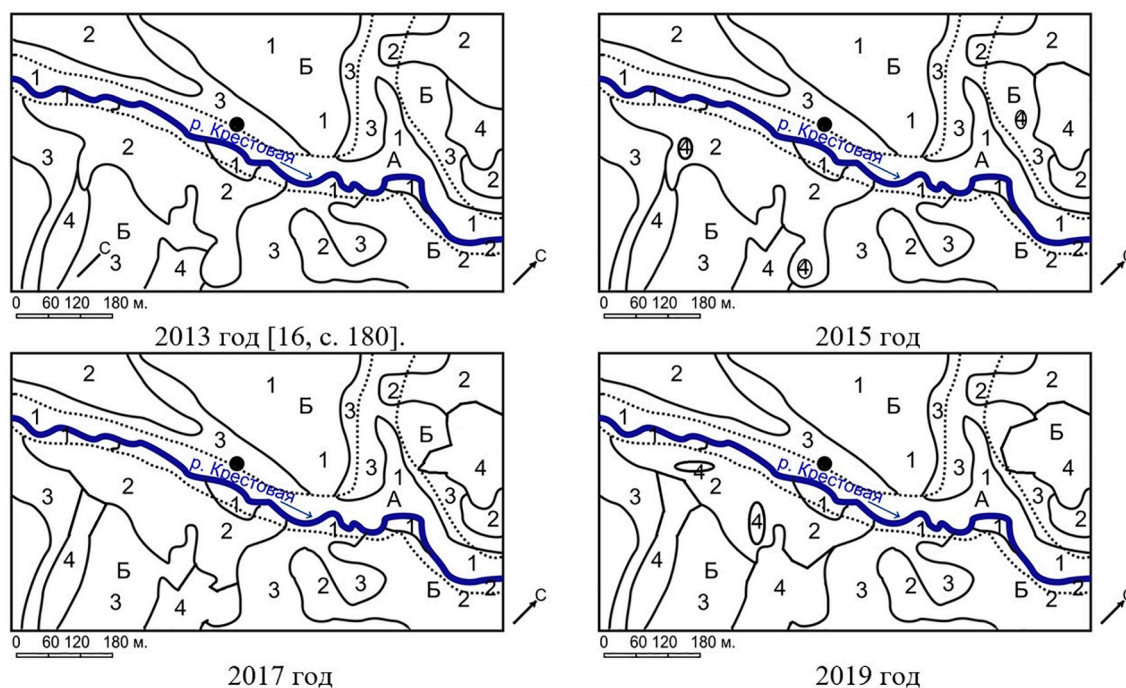


Рис. 2. Карты-схемы проявлений в период с 2013 по 2019 г. динамики природно обусловленных процессов деградации структуры без смены инварианта внутриландшафтных комплексов высоких эрозионно-аккумулятивных пологонаклоненных, увалистых с останцами площадок Нижнеамурской равнины с южнотаежными светлохвойно-мелколиственными комплексами на буротаежных и буротаежных оглеенных почвах, смешаннолесными светлохвойно-мелколиственно-кустарниково-травяными комплексами на буроземных почвах, маревыми комплексами на болотных почвах в пределах долины р. Крестовая, притока р. Малый Ольдой (Хабаровский край) (с использованием материалов источника [16])

На карте-схеме индексами обозначены. Урочища: А) долины постоянного водотока (малая р. Крестовая); Б) недифференцированных аккумулятивных площадок низкой и высокой поймы. Ландшафтные фации (фитоценозы): 1) маревые влажно-кочкарно-пушицево-травяно-моховые; 2) сосново-лиственнично-березово-мохово-осоковые; 3) лиственнично-березово-ольхово-осоково-моховые; 4) березово-осоковые.

Условные знаки: – границы урочищ; ● – точки позиционной привязки; ———— – границы ландшафтных фаций (фитоценозов)

Сочетание воздействий зональных и азональных факторов территории определяет формирование и неопределенно долгое сохранение естественного состояния структуры ландшафтного комплекса [7–9] с наличием латентных процессов автовосстановления, деградации, деструкции и элиминации структуры. При этом именно на этапе (стадии) квазистабильного состояния формируются латентные («дремлющие») элементы, определяющие направления динамики сохранения, устойчивости или смены инварианта комплекса [10–12]. Именно на этапе динамики с частично измененным состоянием определяют стабилизацию постоянно создающегося при взаимодействии природных и антропогенных факторов неравновесного состояния с сохранением исходного инварианта [4; 13; 14].

Из всей совокупности 10 782 лесных элементарных внутриландшафтных комплексов (фаций, групп фаций, топогеосистем) в пределах стационарных площадок на территории субъектов ДФО (русской части северо-востока Евразии), 3673 (35,8 %) выдела имеют хорошо выраженные признаки процессов и сформировавшихся результатов автовосстановления (постантропогенное – 2736 выделов (26,6 %); природно-постдеструктивное – 937 выделов (9,2 %), которые ранее детально рассмотрены [4; 6; 15]. В совокупности автовосстановившихся комплексов дифференцированы 65 случаев (0,6 %) автовосстановления нарушенной структуры комплексов с вероятной коренной сменой инварианта комплекса и 204 случая (1,9 %) с вероятной глубокой трансформацией исходной структуры инварианта комплекса.

Также дифференцированы 6152 (57 %) выдела внутриландшафтных комплексов с проявлениями деградиционных изменений структуры (в том числе 2484 (23 %) контура с четкими проявлениями процессов деградациии структуры) [4; 6]. Из них только 4 (0,03 % всей выборки наблюдения) выдела имеют признаки вероятной смены инварианта комплекса и 12 (0,1 %) выделов – признаки вероятной глубокой трансформации исходной структуры инварианта комплекса. В качестве примера проявления подобных процессов можно привести наблюдаемые этапы эволюционного изменения структуры антропогенно трансформированных фитоценозов (уничтожение (вырубка) сообществ, образованных сосной обыкновенной) и их

сукцессионно-инвазионного замещения растительными сообществами, образованными березой, с трансформацией, но сохранением инварианта комплексов (рис. 1).

Подобная же ситуация может быть обусловлена естественным увеличением обводненности при изменении термического режима почв и грунтов в зоне распространения многолетнемерзлых пород, что вызывает развитие процессов термокарста с формированием вальника, «пьяного леса» с гибелью древесных растений сосны обыкновенной, лиственницы Каяндера и постепенным их замещением без смены инварианта системы более приспособленными к таковым условиям фитоценозам, образованным березой (рис. 2).

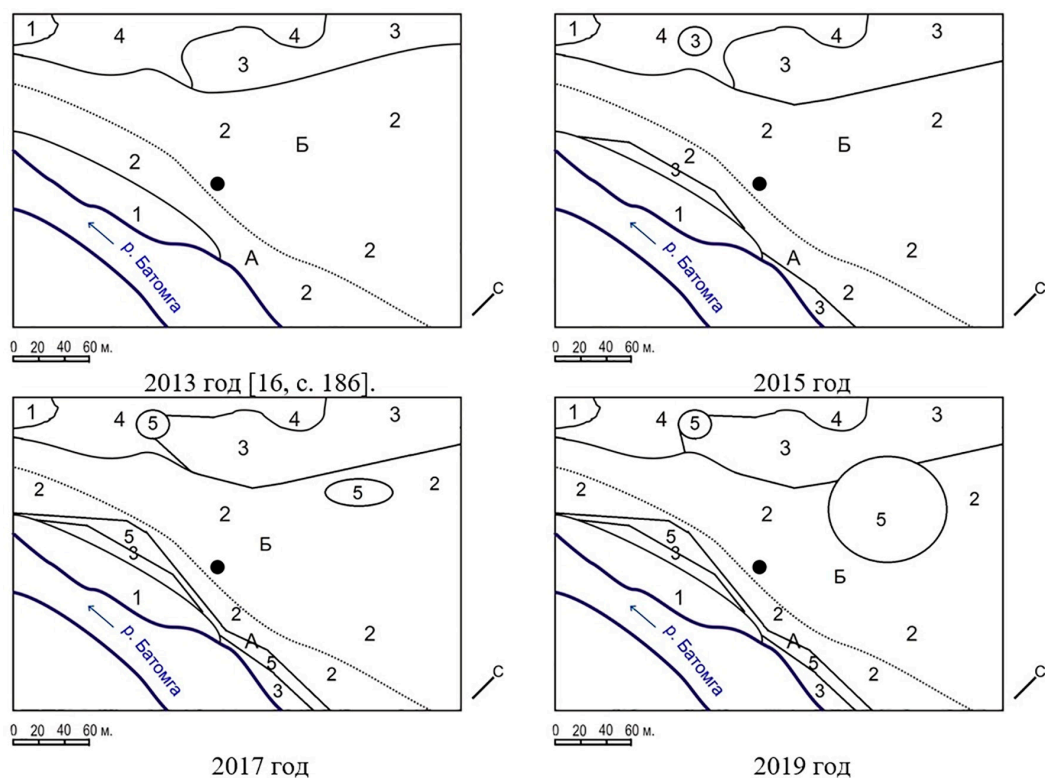


Рис. 3. Карта-схема проявлений в период с 2013 по 2019 гг. динамики природно обусловленных процессов деградациии структуры со сменой инварианта внутриландшафтных комплексов низкогорных и среднегорных складчато-глыбовых поднятий Аянско-Майского комплекса со среднетаежными ерниково-светлохвойно-мелколиственными комплексами на буротаежных почвах, долинными мелколиственно-кустарниковыми комплексами на аллювиальных почвах, маревыми комплексами на болотных почвах в пределах долины р. Батомга, притока р. Мая (Хабаровский край) (с использованием материалов источника [16]).

На карте-схеме индексами обозначены. Урочища: А) недифференцированных аккумулятивных площадок низкой и высокой поймы; Б) пологонаклоненных денудационных пологоволнистых и бугристо-западинных поверхностей площадок I и II надпойменных террас р. Батомга. Ландшафтные фаши (фитоценозы): 1) песчаные пляжи; 2) елово-березово-осоково-моховые; 3) маревые влажно-кочкарно-пушицево-травяно-моховые; 4) стланиковые березово-мохово-осоковые; 5) маревые сухо-кочкарно-березово-моховые.

Условные знаки: – границы урочищ; ● – точки позиционной привязки;
— — границы ландшафтных фаши (фитоценозов)

В пределах территории ДФО дифференцированы 768 (7 %) выделов лесных внутриландшафтных комплексов с четко выраженными признаками развития процессов деструкции и элиминации (из них антропогенно обусловленных – 415 (4 %) контуров) [4; 6]. Из них у 207 (1,9 %) выделов проявляется природно и антропогенно обусловленная элиминация [4; 6]. 121 (1,12 % всей выборки) выдел (в том числе с проявлениями процессов элиминации – 83 (0,76 %) имеет четко дифференцируемые признаки вероятной смены инварианта комплекса, а у 307 (2,84 %) выделов имеются признаки вероятной глубокой трансформации исходной структуры инварианта комплекса. Примером может быть выявленная постепенная элиминация (вследствие переувлажнения почв и грунтов) светлехвойных фитоценозов и их полное замещение маревыми сообществами (переходными и верховыми болотами) (рис. 3), то есть смене типа инварианта. Причиной этого является установление более ранних сроков оттаивания почв и грунтов (вследствие даже незначительного увеличения среднегодовых температур воздуха) в условиях территории распространения многолетнемерзлых пород, которые в описываемом случае выступают водоупорным горизонтом, что затрудняет своевременное и полное дренирование выровненных и слабоогнутых поверхностей водоразделов.

Таким образом, на территории наблюдения 190 (1,76 % всей выборки) выделов лесных внутриландшафтных комплексов характеризуются проявлением четко дифференцируемых признаков вероятной смены инварианта комплекса, а 523 (4,85 %) выдела – признаков вероятной глубокой трансформации исходной структуры с сохранением инварианта комплекса. Это свидетельствует о крайне незначительном уровне интенсивности развития процессов деструкции и элиминации комплексов с формированием результатов в форме смены их инварианта.

Заключение

Развитие естественных и антропогенно обусловленных обратимых и необратимых изменений структуры вплоть до смены инварианта или же репродуктивная стабилизация инварианта ландшафтных комплексов, как показывает настоящее исследование, обязательно сопровождается изменениями морфологических показателей систем. Анализ стабильности или переменности состояний компонентов и элементов ландшафтного комплекса требует изучения процессов

автовосстановления, деградации, деструкции и элиминации комплексов. Сохранение общего типа, характера инварианта позволяет говорить о его квазистабильности, в то время как его смена характеризует формирование уникальных приспособительных реакций ландшафтных комплексов к изменяющемуся природным и антропогенным факторам окружающей среды.

Без сомнения, наблюдаемые процессы смены инвариантов лесных ландшафтных комплексов в пределах территории ДФО достаточно редки и преимущественно связаны с развитием глубоко трансформирующих характер природных компонентов, определенный природными факторами, процессами деструкции и элиминации комплексов. Установлено что, хотя процессы деструкции и элиминации комплексов, обусловленные природными факторами, в количественном отношении проявлений уступают таковым антропогенного происхождения, по площади участков, охваченных их проявлениями, они доминируют.

Столь малый уровень проявления признаков коренной деструкции вплоть до уровня смены инварианта комплекса, характерный для лесных ландшафтных комплексов территории ДФО, может соответствовать показателям лесных ландшафтов иных природных регионов или, наоборот, быть исключением из совокупности ландшафтов с более значительными уровнями антропогенных воздействий, преобразований. Установление же закономерностей и региональной специфики причинно-следственных факторов, проявлений процессов сохранения и смены инвариантов ландшафтных комплексов крайне важно для решения общенаучных, практико-ориентированных задач в определении уровней устойчивости и путей рационализации использования ландшафтов, оптимизации природопользования и может быть продолжено на основе представленных материалов и в сопоставлении с ними в ходе дальнейших исследований применительно к другим физико-географическим регионам Евразии.

Список литературы

1. Сочава В. Б. Введение в учение о геосистемах. Новосибирск: Наука, 1978. 320 с. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22605946> (дата обращения: 24.02.2026).
2. Крауклис А. А. Проблемы экспериментального ландшафтоведения. Новосибирск: Наука, 1979. 233 с. URL: https://psv4.userapi.com/s/v1/d/s1/SnW9PVuIVpEisHs92MPhWraD6r98HbGdLVFKQ6-S8U7AxX3gP_BX7yRoAXBmLY-e6vTTPgI01R7eMudIHTdeaG-5_nuNkSTC3cZmMyBUd63b-KV2J-UXA/Krauklis_A_A_Problemy_experimentalnogo_landshaftovedenia.pdf (дата обращения: 24.02.2026).

3. Семенов Ю. М. *Ландшафтно-геохимический синтез и организация геосистем*. Новосибирск: Наука, 1991. 145 с. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21654574> (дата обращения: 24.02.2026).
4. Алексеев И. А. Региональная специфика автовосстановления структуры антропогенно нарушенных лесных ландшафтов северо-восточной окраины Евразии: дис. ... докт. геогр. наук. ЗАТО Циолковский, 2024. 603 с. URL: <https://igsbras.ru/uploads/theses/August2024//FyEmgeQ1jGLczoYWTQZ0SZo3XpxNBiy QhjUBsxur.pdf> (дата обращения: 24.02.2026).
5. Хорошев А. В. Функционально-динамический подход к исследованию ландшафтных границ // *Региональные исследования*. 2022. № 3 (77). С. 60–70. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50260444> (дата обращения: 24.02.2026). DOI: 10.5922/1994-5280-2022-3-6.
6. Алексеев И. А. К вопросу о процессах деградации и деструкции структуры ландшафтных комплексов // *Геополитика и экогеодинамика регионов*. 2025. Т. 11 (21). Вып. 2. С. 109–123. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=82517118> (дата обращения: 24.02.2026).
7. Чибилев А. А., Мелешкин Д. С., Григорьевский Д. В. Оценка ландшафтно-экологической устойчивости геосистемы Среднего Поуралья // *Успехи современного естествознания*. 2019. № 7. С. 133–138. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=37172> (дата обращения: 24.02.2026). DOI: 10.17513/use.37172.
8. Скрыльник Г. П. Основные уровни устойчивости в общей организации геосистем // *Успехи современного естествознания*. 2017. № 11. С. 101–106. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=36589> (дата обращения: 24.02.2026).
9. Балязин И. В. Анализ динамики степных геосистем с применением картографического метода на примере Койбальской степи // *Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле»*. 2018. Т. 26. С. 18–30. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35466244> (дата обращения: 24.02.2026). DOI: 10.26516/2073-3402.2018.26.18
10. Ганзей К. С., Пшеничникова Н. Ф., Киселева А. Г. Оценка устойчивости ландшафтов острова Русский (Японское море) // *Вестник ДВО РАН*. 2018. № 2. С. 86–94. URL: https://tugdvo.ru/assets/files/publications/2018_main_results/Ganzej-Pshenichnikova-Kiseleva.pdf (дата обращения: 24.02.2026).
11. Дмитриев В. В., Огурцов А. Н., Морозова А. С., Пилюгина А. А., Свердлова О. А., Сиротина П. М., Федорова М. Е., Черепанов С. В., Шакуров В. А. Интегральная оценка устойчивости ландшафтов: модели, результаты, перспективы // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2017. № 9. С. 110–114. URL: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=11837> (дата обращения: 24.02.2026).
12. Владимиров И. Н. Экологический потенциал геосистем Байкальской Сибири как основа оптимизации природопользования в регионе // *География и природные ресурсы*. 2020. № 5. С. 6–13. URL: <https://www.sibran.ru/upload/iblock/d1f/d1fef0394919c7d76a502c6a8444a1b2.pdf> (дата обращения: 24.02.2026). DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2020-5(6-13).
13. Байбар А. С., Пузаченко М. Ю., Сандлерский Р. Б., Кренке А. Н. Ландшафтные инварианты – параметры порядка динамической системы // *Известия РАН. Серия географическая*. 2023. Т. 87. № 3. С. 370–390. URL: <https://sciencejournals.ru/view-article/?j=izvgeo&y=2023&v=87&n=3&a=IzvGeo2303005Baibar> (дата обращения: 24.02.2026). DOI: 10.31857/S2587556623030056.
14. Бибаева А. Ю. Прогноз преобразования геосистем северного Приольхонья // *Успехи современного естествознания*. 2018. № 7. С. 90–94. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=36809> (дата обращения: 25.02.2026). DOI: 10.17513/use.36809.
15. Алексеев И. А. К вопросу о процессах самовосстановления структуры ландшафтных комплексов, находящихся на стадии постантропогенного развития // *Успехи современного естествознания*. 2024. № 4. С. 22–27. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=38244> (дата обращения: 24.02.2026). DOI: 10.17513/use.38244.
16. Алексеев И. А. *Пространственный рисунок элементарных ландшафтов лесной зоны территории южной части Дальневосточного федерального округа*. Благовещенск: Изд-во ДальГАУ, 2022. 193 с.: 261 карта-схема. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50211555> (дата обращения: 20.03.2026).

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование: Исследование выполнено за счет средств государственного задания № 126020516556-1.

Financing: The study was carried out using funds from state assignment No. 126020516556-1.



ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА И ОПТИМИЗАЦИЯ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ СТЕПНЫХ АГРОЛАНДШАФТОВ В УСЛОВИЯХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ И АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКИ

Гринцов Д. А. ORCID ID 0000-0003-2147-0709,
Нестеренко М. Ю. ORCID ID 0000-0003-1465-0752,
Соломатин Н. В. ORCID ID 0000-0002-9623-8069

*Оренбургский федеральный исследовательский центр Уральского отделения
Российской академии наук, Оренбург, Российская Федерация,
e-mail: arisstroy204@gmail.com*

Цель исследования – комплексная геоэкологическая оценка агроландшафтов, основанная на анализе пространственно-дифференцированных данных агрохимического и почвенно-физического обследования. В ходе исследования применен конвергентный подход, сочетающий методы ГИС-аналитики, геоэкологии и анализа полученных данных. Исследования проводились с 2015 по 2025 г. в условиях степной зоны Оренбургского Предуалья. Проведена геоэкологическая оценка стабильности почв на основе коэффициента комплексного плодородия. Кластерный анализ позволил выделить и картографировать четыре статистически достоверные ($p < 0,05$) типологические группы экологического состояния почв (ареалы землепользования), обусловленные режимом антропогенной нагрузки. Установлены статистически достоверные обратные корреляционные связи между показателем твердости почвы и запасом продуктивной влаги ($r = -0,87$, $p < 0,01$) и прямой связью с количеством рудеральных видов растений ($r = +0,79$). Выявлено, что в условиях степной зоны Южного Урала физико-механическое уплотнение почвы является доминирующим фактором снижения почвенного плодородия и деградации почв. На основе анализа полученных данных коэффициента комплексного плодородия разработана схема геоэкологического зонирования территории с дифференцированными рекомендациями в рамках устойчивого землепользования.

Ключевые слова: геоэкология, деградация почв, коэффициент комплексного плодородия, устойчивое землепользование

GEOECOLOGICAL ASSESSMENT AND OPTIMIZATION OF LAND USE IN STEPPE AGROLANDSCAPES UNDER CLIMATE CHANGE AND ANTHROPOGENIC LOAD

Grintzov D. A. ORCID ID 0000-0003-2147-0709,
Nesterenko M. Yu. ORCID ID 0000-0003-1465-0752,
Solomatin N. V. ORCID ID 0000-0002-9623-8069

*Orenburg Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Orenburg, Russian Federation, e-mail: arisstroy204@gmail.com*

Research aim: a comprehensive geoecological assessment of agricultural landscapes based on the analysis of spatially differentiated data from agrochemical and soil-physical surveys. A convergent approach combining GIS analytics, geostatistics, and analysis of the obtained data was employed. The research was conducted from 2015 to 2025 in the steppe zone of the Orenburg Cis-Urals. A geoecological assessment of soil stability was performed based on the integrated fertility coefficient. Cluster analysis enabled the identification and mapping of four statistically reliable ($p < 0,05$) typological groups of soil ecological status (land use areas) determined by the pattern of anthropogenic pressure. Statistically significant inverse correlations were established between soil hardness and available water storage ($r = -0,87$, $p < 0,01$) and a direct correlation with the number of ruderal plant species ($r = +0,79$). It was found that, in the steppe zone of the Southern Urals, mechanical soil compaction is the dominant factor reducing soil fertility and causing soil degradation. Based on the analysis of the obtained integrated fertility coefficient data, a geoecological zoning scheme for the territory was developed, providing differentiated recommendations for sustainable land use.

Keywords: geoecology, soil degradation, Integrated Fertility Coefficient, sustainable land management

Введение

Сохранение почв включает в себя защиту освоенных почв от качественной деградации, предотвращение негативных структурно-функциональных изменений, сохранение и восстановление естественных почв как компонента биосферы [1; 2]. Процессы почвенной эрозии, потери гумуса, уплотне-

ния почв, пастбищной дигрессии снижают продукционный потенциал агроценозов и ведут к системной утрате экологических функций и плодородия почвенного покрова [3; 4]. Проблемы деградации в степной зоне не являются разрозненными. Они представляют собой системное нарушение базовых экологических принципов. Антропогенная

нагрузка, не адаптированная к естественной устойчивости ландшафта, через процесс физического уплотнения почвы запускает каскад взаимосвязанных негативных изменений (гидрологических, биологических, продукционных) [5; 6].

Для решения этих задач проведена геоэкологическая оценка плодородия почв действующего сельскохозяйственного предприятия на площади 4132 га за 2015-2025 гг. В качестве инструмента исследования экологической стабильности почв был применён разработанный нами коэффициент комплексного плодородия ($K_{\text{кп}}$) почв. Его методическая новизна заключается в интеграции комплекса агроэкологических параметров физического состояния почв в единый показатель, количественно отражающий основу функционирования системы «почва – растение – атмосфера». Структурно-функциональная конструкция состоит из встроенных друг в друга различных показателей. При этом в качестве базовых критериев выбраны прежде всего физические, гидрологические и биологические параметры состояния почв. Агрохимические показатели сознательно не были включены в интегральный расчёт, поскольку они в значительной степени являются результатом текущего антропогенного управления (внесения удобрений) и обладают высокой временной изменчивостью.

Данный подход позволяет моделировать продуктивность на основе биологических и физических параметров состояния почв, формирует основу для междисциплинарного взаимодействия на стыке геоэкологии, агрономии и климатологии.

В результате кластерного анализа показателей коэффициента комплексного плодородия ($K_{\text{кп}}$) почв были выделены и картографированы четыре статистически достоверные ($p < 0,05$) типологические группы (ареалы землепользования), обусловленные режимом антропогенной нагрузки: «антропогенно-деградирующий», «антропогенно-стабильный», «антропогенно-восстановительный» и «адаптивно-ландшафтный». Данная классификация оказывает существенное влияние на выбор технологических типов воздействия на поч-

венные ресурсы, позволяет прогнозировать устойчивость агросистем к климатическим условиям и служит основой для оптимизации землепользования, обеспечивая баланс между сельскохозяйственной продуктивностью и долгосрочной экологической стабильностью [7; 8].

Цель исследования – проведение геоэкологической оценки состояния агроландшафтов с последующим зонированием территории для устойчивого землепользования; разработка научно обоснованных рекомендаций по агротехнологическим приемам исходя из анализа пространственных взаимосвязей между физическим состоянием почв, типами антропогенной нагрузки и их интегральными эффектами для сохранения почвенного плодородия, предотвращения негативных структурно-функциональных изменений почв.

Материалы и методы исследования

Основное внимание исследования уделялось анализу механизмов антропогенной трансформации почвенного покрова и регулированию микроклиматических условий в почве, повышению эффективности накопления влаги и оптимизации агрофизических свойств почв. Эти аспекты имеют ключевое значение для снижения деградации почвенного покрова, роста продуктивности агроландшафтов и повышения их устойчивости к аридным условиям Южного Урала и климатическим изменениям.

Методический аппарат

1. Агрегированная модель, на основе которой разработана формула расчета коэффициента комплексного плодородия ($K_{\text{кп}}$) почв [9]. Способ оценки комплексного плодородия почвы включает измерение фактических значений физических параметров почвы: запаса влаги в слое 0–100 см, мм (W), объёмной массы почвы в слое 0–30 см, г/см³ (D), твёрдости почвы в слое 0–50 см, МПа (H), содержания агрономически ценных агрегатов 0,25–10 мм, % в слое почвы 0–30 см (S) и количества сорных растений шт/м² (Z), и анализ предварительно заданных нормативных значений, после чего вычисляют комплексный показатель плодородия $K_{\text{кп}}$ по формуле:

$$K_{\text{кп}} = \gamma_1 * \frac{W - W_{\text{min accept}}}{W_{\text{max}} - W_{\text{min accept}}} + \gamma_2 * \frac{D_{\text{max accept}} - D}{D_{\text{max}} - D_{\text{max accept}}} + \gamma_3 * \frac{H_{\text{max accept}} - H}{H_{\text{max}} - H_{\text{max accept}}} + \gamma_4 * \frac{S - S_{\text{max accept}}}{S_{\text{max}} - S_{\text{max accept}}} + \gamma_5 * \frac{Z_{\text{max accept}} - Z}{Z_{\text{max}} - Z_{\text{max accept}}} \quad (1)$$

Для анализа значений показателя интегрального коэффициента комплексного плодородия ($K_{кп}$), разработанного с учётом положений физики почв и агроэкологических параметров, предложена следующая категоризация состояния агросистем:

- $K_{кп} \geq 0,6$ – зона высокого плодородия и экологической стабильности. Данный диапазон соответствует оптимальному физическому состоянию почв, характеризующемуся благоприятными показателями структурно-агрегатного состава, условий для хорошей водопроницаемости и накопления влаги. Характеризуется высокой эрозионной устойчивостью;

- $0,4 \leq K_{кп} < 0,6$ – зона умеренного плодородия и повышенных рисков. В этом диапазоне наблюдается начальная стадия деградации физического состояния почвы. Основной задачей в данном диапазоне значений ($K_{кп}$) является выбор агротехнологий, направленных на сохранение почвенного плодородия и предотвращение уплотнения;

- $K_{кп} < 0,4$ – зона низкого плодородия и выраженной деградации. Низкие значения коэффициента являются индикатором критического ухудшения агрофизических параметров: переуплотнения, снижения пористости, ухудшения водопроницаемости и потери агрономически ценных агрегатов. Это ведёт к дисбалансу водного режима, усилению эрозионных процессов и резкому падению продуктивности агроценозов.

2. Геоинформационное картографирование и пространственный анализ. Методами интерполяции построены серии тематических картосхем, визуализирующих пространственное распределение ключевых параметров состояния почв.

3. Метод экспертных оценок и синтеза. На заключительном этапе проведена интегральная оценка и разработана схема зонирования территории по экологическому статусу и коэффициенту комплексного плодородия ($K_{кп}$) почв (рисунок).

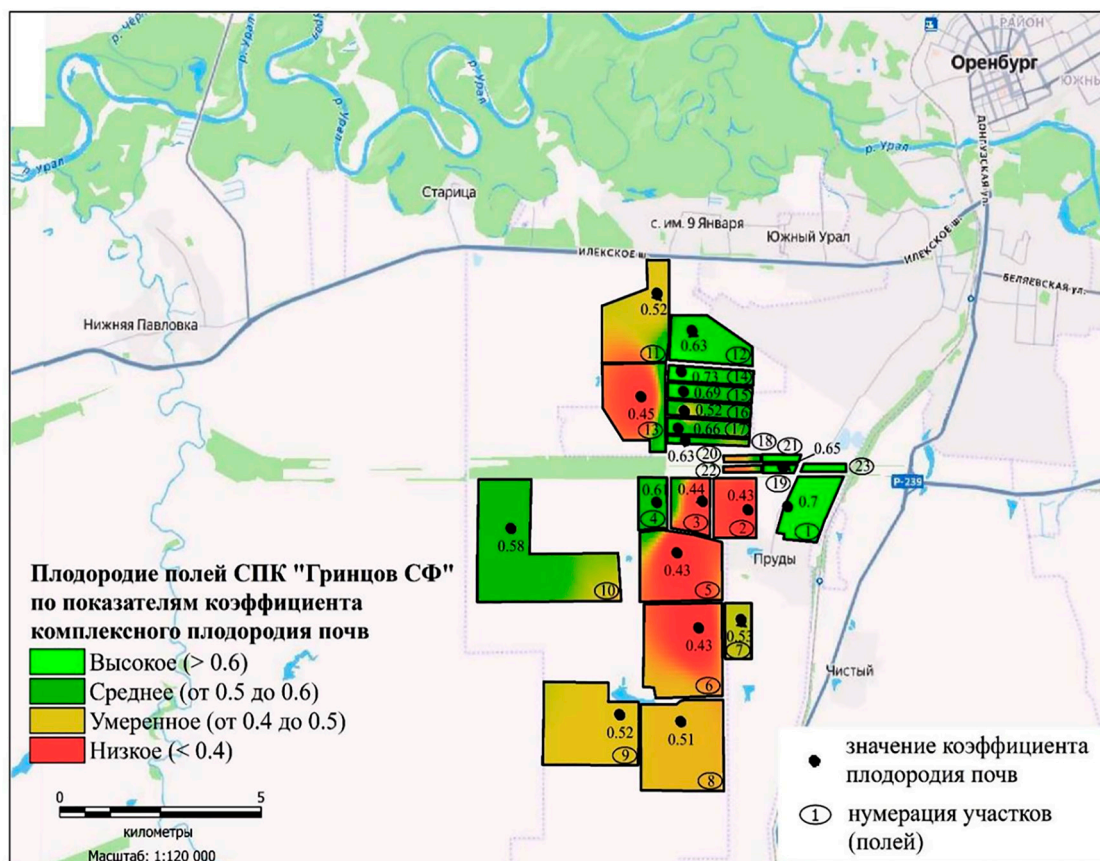
Результаты исследования и их обсуждение

Для выявления пространственных закономерностей и взаимосвязей применен кластерный анализ, позволивший выделить типологические группы полей (ареалы землепользования) со схожим экологическим статусом на основе рассчитанных значений ($K_{кп}$) и ключевых почвенных показателей. Статистическая достоверность кластеров была подтверждена дисперсионным анализом ($p < 0,05$). В результате были идентифицированы четыре устойчивые группы, характеристика которых представлена в таблице. Выделенные группы отражают градации геоэкологического состояния почв, обусловленные различным уровнем и характером антропогенной нагрузки, что позволяет рассматривать их в качестве основы для пространственной дифференциации территории на ареалы землепользования.

Значения коэффициента комплексного плодородия ($K_{кп}$) почв и сопутствующих параметров для типологических групп агроландшафтов (ареалы землепользования)

Показатель	Типологические группы агроландшафтов			
	Антропогенно-деградирующий	Антропогенно-восстановительный	Антропогенно-стабильный	Адаптивно-ландшафтный
Запас влаги в почве, мм	18-26	80-112	55-65	98-105
Твердость почвы (сопротивление проникновению), МПа	6,03-6,52	2,32-5,07	4,98-5,83	1,68-1,98
Коэффициент комплексного плодородия почвы	0,43-0,44	0,58-0,70	0,51-0,56	0,69-0,73
Количество рудеральных видов растений, шт./м ²	33,2-35,8	7,8-17,2	26,2-31,0	6,3-8,0
Содержание гумуса в почве, %	3,2	2,8-3,9	3,3-4,0	3,7
Содержание агрономически ценных агрегатов в почве, %	67,2	69,4	67,0-71,1	67,0
Объемная масса почвы, г/см ³	1,20-1,21	1,16-1,18	1,16-1,19	1,15

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



*Геоэкологическое зонирование территории по значениям коэффициента комплексного плодородия ($K_{кл}$) почв
Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования*

Выявленные структурно-функциональные зависимости отражают характер ответных реакций почвенной системы на антропогенную нагрузку и служат индикаторами её устойчивости. Полученные временные ряды служат основой для прогнозирования состояния почвенного покрова и обоснования адаптивных стратегий землепользования, направленных на сохранение экологических функций почв.

Кластерный анализ и последующая верификация методами описательной статистики позволили дифференцировать всю совокупность полей на четыре статистически достоверные ($p < 0,05$) типологические группы (рис.).

Выделенные кластеры отражают не только текущий уровень почвенного плодородия, но и различную степень антропогенной трансформации агроландшафта, а также их потенциальную способность к самовосстановлению. Пространственная дифференциация полученных групп позволяет рассматривать их как самостоятельные

геоэкологические ареалы, различающиеся по характеру и интенсивности природно-антропогенных процессов:

- группа I. Антропогенно-деградирующие угодья (поля 2, 3, 5, 6, 13). Данный кластер характеризуется критическими значениями по комплексу показателей. Средний запас влаги в почве составляет $21,2 \pm 3,5$ мм, что свидетельствует о нарушении водного режима. Объемная масса почвы ($1,21 \pm 0,01$ г/см³) и твердость почвы ($6,27 \pm 0,24$ МПа) достигают максимумов, указывая на выраженное физическое переуплотнение, соответствующее III-IV стадии пастбищной дигрессии [10]. Фитосанитарное состояние оценивается как неудовлетворительное (количество рудеральных видов растений $34,6 \pm 1,3$ шт./м²). Интегральный коэффициент плодородия минимален ($0,44 \pm 0,01$);

- группа II. Антропогенно-стабильная пашня (поля 7, 8, 9, 11). Угодья этой группы демонстрируют условно равновесное состояние. Запас влаги в почве $57,2 \pm 1,9$ мм, твердость почвы $5,62 \pm 0,09$ МПа. Относительно

стабильное содержание гумуса ($3,5 \pm 0,3\%$) и количество сорняков ($26,3 \pm 0,4$ шт./м²) позволяет классифицировать данную систему как устойчивую при текущем уровне антропогенной нагрузки. Участки соответствуют чернозёму южному плакорному, находящемуся под посевами яровых зерновых и характеризующемуся относительно равновесным водным режимом [11];

- группа III. Антропогенно-восстановительный режим землепользования (поля 1, 10, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22). Кластер объединяет участки с признаками активного почвообразования и восстановления экологических функций. Наблюдается статистически значимое улучшение всех параметров: максимальный запас влаги в почве ($95,3 \pm 13,1$ мм), оптимальный показатель объемной массы почвы ($1,16 \pm 0,01$ г/см³) и твердости почвы ($3,20 \pm 1,07$ МПа.), минимальная засоренность ($9,0 \pm 2,7$ шт./м²). Коэффициент плодородия достигает высоких значений ($0,65 \pm 0,05$). Особенно показательна динамика на полях, находящихся в залежи шесть лет (1, 10, 16, 17), что эмпирически подтверждает восстановление чернозёмных почв, улучшение их структуры и водопроницаемости после снятия антропогенной нагрузки. Выявленная эффективность залежей согласуется с наблюдениями о формировании вторичных степей на постагрогенных землях [12];

- группа IV. Адаптивно-ландшафтная система землепользования (поля 4, 12, 14, 15.). Данный кластер демонстрирует оптимальные агрофизические показатели: запас продуктивной влаги в почве ($101,5 \pm 4,9$ мм), оптимальную твёрдость почвы ($1,81 \pm 0,18$ МПа) и высокий коэффициент плодородия ($0,69 \pm 0,05$). Система является наиболее стабильной в среднесрочной перспективе. Высокие текущие показатели достигнуты за счет технологического типа воздействия (глубокое рыхление без оборота пласта с сохранением пожнивных остатков на поверхности почвы), которое поддерживает хорошее физическое состояние почвы. Участки расположены на плакорных чернозёмах, применяемые щадящие обработки соответствуют принципам природоподобных технологий и рекомендациям по концентрации ресурсов на элитных пахотных землях [13]. Но важно учитывать и контролировать дальнейшее развитие почвенных процессов для избегания интенсификации процессов минерализации органического вещества [14; 15].

Выводы

Методами многомерной статистики впервые для территории исследования осуществлена объективная классификация, позволившая выделить ($p < 0,05$) типологические группы (ареалы землепользования), обусловленные режимом антропогенной нагрузки для принятия взвешенных решений в рамках устойчивого землепользования и в условиях нарастающей аридизации климата. Классификация детализирована с учётом региональных особенностей почвенного покрова и структуры. Установлено, что наиболее деградированные состояния ассоциированы с комплексами солонцеватых слабосмытых почв.

1. Средствами ГИС-аналитики схематически отражено пространственное расположение полей, формирующих ареалы с определенными видами антропогенной нагрузки (деградации и восстановительных процессов почвенной системы), в условиях исторически сложившейся организации землепользования. Предложенная схема геоэкологического зонирования на основе коэффициента комплексного плодородия ($K_{\text{кп}}$) позволяет объективно картографировать малопродуктивные участки.

2. Установлена фундаментальная роль физического уплотнения почвы в процессах деградации. Наиболее значимой является сильная обратная корреляция между твердостью почвы и запасом продуктивной влаги ($r = -0,87$) и прямая связь с количеством рудеральных видов растений ($r = +0,79$). Данный результат подтверждает, что механическое и другое уплотнение почвы является основным фактором деградации, запускающим каскад негативных процессов. Выявленная зависимость особенно критична для солонцовых и солонцеватых комплексов, где высокая плотность сложения изначально лимитирует продуктивный запас влаги и усиливает зависимость агроценозов от засух.

3. Подтверждена высокая агроэкологическая эффективность восстановительных режимов, в частности длительной залежи, что подтверждается статистически значимым улучшением комплекса почвенных физических свойств. Полученные данные ($K_{\text{кп}} = 0,65$ после 6 лет залежи) служат количественным подтверждением эффективности консервации деградированных земель и согласуются с концепцией формирования вторичных степей на постагрогенных территориях.

4. Разработана и научно обоснована схема геоэкологического зонирования территории, представляющая собой практический инструмент для планирования агротехнологических приемов. Проведенное исследование является реализацией принципов адаптивно-ландшафтного подхода и адаптивно-стратегического планирования для сельскохозяйственного предприятия. Результаты подтверждают, что пространственно-дифференцированное управление, основанное на комплексной геоэкологической оценке и соотнесенное с региональной агроэкологической группировкой земель, есть необходимое условие для преодоления деградации и перехода к устойчивому землепользованию в условиях нарастающей аридизации климата.

Список литературы

1. Добровольский Г. В., Никитин Е. Д. Экология почв. Учение об экологических функциях почв: учебник. 2-е изд., уточн. и доп. М.: Издательство Московского университета, 2012. 412 с. ISBN: 978-5-211-06211-5.
2. Куст Г. С., Андреева О. В., Зонн И. С. Деградация земель, опустынивание и устойчивое землепользование: концепции и терминология / под редакцией Г. С. Куста; Институт географии РАН, Научно-координационный центр по борьбе с опустыниванием и смягчению последствий засухи имени Н. Ф. Глазовского. М.: МАКС Пресс, 2024. 205 с. ISBN: 978-5-317-07154-7.
3. Lal R. Soil erosion and the global carbon budget // *Environment International*. 2003. Vol. 29. № 4. P. 437-450. DOI: 10.1016/S0160-4120(02)00192-7. EDN: MBQQYZ.
4. Montanarella L., Pennock D. J., McKenzie N., Badraoui M., Chude V., Baptista I. World's Soils Are under Threat // *Soil* 2016. Vol. 2. P. 79-82. URL: <https://www.researchgate.net/publication/296396342> (дата обращения: 02.03.2026).
5. Гулянов Ю. А., Чибилёв А. А. (мл), Чибилёв А. А., Левыкин С. В. Проблемы адаптации степного землепользования к антропогенным и климатическим изменениям (на примере Оренбургской области) // *Известия РАН. Серия географическая*. 2022. № 1. С. 28-40. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47807138> (дата обращения: 21.02.2026). DOI: 10.31857/S258755662201006X.
6. Махотлова М. Ш., Хашукаева А. А., Бегидов А. Р., Мизов И. М., Кармокова Д. Г., Гуппоева Д. С. Экологическая оценка современного состояния агроэкосистем // *International Agricultural Journal*. 2023. № 1. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50337320> (дата обращения: 02.03.2026). DOI: 10.55186/25876740_2023_7_1_30. EDN: UGMBGW.
7. Кирюшин В. И., Дубачинская Н. Н. Проблема освоения адаптивно-ландшафтных систем земледелия в Оренбургской области // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2020. № 6. С. 9-14. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44384981> (дата обращения: 15.03.2026). DOI: 10.37670/2073-0853-2020-86-6-9-14. EDN: VOLKVD.
8. Chotte J. L., Aynekulu E., Cowie A., Campbell E., Vlek P., Lal R., Kapović-Solomun M., von Maltitz G., Kust G., Barger N., Vargas R., Gastrow S. Realising the Carbon Benefits of Sustainable Land Management Practices: Guidelines for Estimation of Soil Organic Carbon in the Context of Land Degradation Neutrality Planning and Monitoring. A report of the Science-Policy Interface. UNCCD, Bonn, Germany, 2019. 108 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/335368368_Realising_the_Carbon_Benefits_of_Sustainable_Land_Management_Practices_Guidelines_for_Estimation_of_Soil_Organic_Carbon_in_the_Context_of_Land_Degradation_Neutrality_Planning_and_Monitoring. DOI: 10.13140/RG.2.2.17098.52167.
9. Антонов А. В. Системный анализ: учеб. для студентов вузов, обучающихся по направлению «Информатика и вычислительная техника» и специальности «Автоматизированные системы обработки информации и управления» М.: Высшая школа, 2004. 451 с. ISBN: 5-06-004862-4.
10. Черников В. А., Алексахин Р. М., Голубев А. В. Агроэкология. М.: Колос, 2000. 536 с. ISBN: 5-10-003269-3.
11. Дубачинская Н. Н., Верещагина А. С. Зависимость продуктивного запаса влаги от водно-физических свойств комплексных солонцовых почв в условиях степной зоны Приуралья // *Norwegian Journal of development of the International Science*. 2019. № 3-2 (28). С. 5-9. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37205989> (дата обращения: 15.03.2026). EDN: ZBIXOP.
12. Телеснина В. М., Курганова И. Н., Лопес Де Геренно В. О., Овсепян Л. А., Личко В. И., Ермолаев А. М., Мирин Д. М. Динамика свойств почв и состава растительности в ходе постагрогенного развития в разных биоклиматических зонах // *Почвоведение*. 2017. № 12. С. 1514-1534 (дата обращения: 15.03.2026). DOI: 10.7868/S0032180X17120115. EDN: ZWLVRN.
13. Чибилёв А. А., Гулянов Ю. А., Левыкин С. В. Новационные природоподобные технологии степного землепользования и природные предпосылки к их разработке. Барнаул: Изд-во Алтайского ун-та, 2023. С. 72. ISBN: 978-5-7904-2797-8.
14. Нестеренко Ю. М., Соломатин Н. В. Эффективность использования водных ресурсов и почв на Южном Урале // *Бюллетень Оренбургского научного центра УрО РАН*. 2019. № 1. С. 8. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38187621> (дата обращения: 19.03.2026). EDN: KMGSJY.
15. Тулина А. С. Влияние температуры, влажности и внесения соломы на динамику минерализации органического вещества и почвенные пулы углерода и азота // *Агрохимия*. 2019. № 3. С. 3-18. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36953839> (дата обращения: 19.03.2026). DOI: 10.1134/S0002188119030141. EDN: SRFCQZ.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.



ДИНАМИКА РАЗВИТИЯ ВОДНОЙ ЭРОЗИИ ПОЧВ В УСЛОВИЯХ МЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА ПРИ РАЗНОМ СОСТОЯНИИ АГРОФОНА

Евсеева Н. С. ORCID ID 0000-0001-5766-5319,
Квасникова З. Н. ORCID ID 0000-0002-5568-2112,
Каширо М. А. ORCID ID 0000-0003-4475-0527,
Петров А. И., Хон А. В., Зайцева В. Ю., Оленникова А. В.

*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский государственный университет», Томск,
Российская Федерация, e-mail: zojkwas@rambler.ru*

Цель данной работы – анализ развития водной эрозии почв в условиях меняющегося климата при разном состоянии агрофона сельскохозяйственных ландшафтов юго-востока Томской области. С использованием расчетных и полевых методов были проведены оценка интенсивности развития эрозии почв от стока талых снеговых вод и сравнительный анализ натуральных и расчетных данных по объему смыва почв со склонов разной экспозиции за период с 1989 по 2025 г.; определены объемы смыва почв со склонов с разным агрофоном ливневыми осадками. Многолетние наблюдения за смывом почв со склонов пашни тальми и снеговыми водами ключевого участка в бассейне р. Басандайки показали, что в зависимости от агрофона процесс по интенсивности изменяется от умеренно опасного до весьма опасного. При грубой зяби поперек склона смыв почв незначителен, как и по стерне, всходам озимых, трав. При ливнях с суммой осадков менее 10–20 мм/сут агрофон пашни с посевами сельскохозяйственных культур достаточно хорошо защищает почвы. Экстремальные ливни (> 30 мм/сут и более) преодолевают сопротивление растительного покрова и производят большой объем смыва почв, который можно сравнить с эрозионной работой стока талых вод за ряд лет. Отмечается усиление ливневой деятельности над территорией Томской области с 2017 г. и частота вызванных ею чрезвычайных происшествий, связанных с водной эрозией на пашнях сельскохозяйственных ландшафтов.

Ключевые слова: водная эрозия, смыв почвы, агрофон, климат, Томская область

DYNAMICS OF DEVELOPMENT OF WATER SOIL EROSION IN CONDITIONS OF A CHANGING CLIMATE WITH DIFFERENT STATES OF THE AGRICULTURAL BACKGROUND

Evseeva N. S. ORCID ID 0000-0001-5766-5319,
Kvasnikova Z. N. ORCID ID 0000-0002-5568-2112,
Kashiro M. A. ORCID ID 0000-0003-4475-0527,
Petrov A. I., Khon A. V., Zaytseva V. Yu., Olennikova A. V.

*Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education
“National Research Tomsk State University”, Tomsk, Russian Federation,
e-mail: zojkwas@rambler.ru*

The objective of this work is to analyze the development of water erosion of soils under conditions of a changing climate with different states of the agricultural background in agricultural landscapes of the southeast of the Tomsk region. Using computational and field methods, the study assessed the intensity of soil erosion caused by snowmelt runoff. A comparative analysis of field and calculated data on soil loss volumes from slopes of different aspects for the period from 1989 to 2025 was carried out, and the volumes of soil loss from slopes with different agricultural backgrounds due to heavy rainfall were determined. Long-term observations of soil loss from arable slopes by meltwater and snowmelt runoff on an experimental catchment in the Basandaika River basin showed that, depending on the agricultural background, the intensity of the process varies from moderate to extremely hazardous. With contour plowing, soil loss is insignificant, as is the case with stubble, winter crop seedlings, and grasses. During heavy rainfall with total precipitation of less than 10–20 mm/day, the agricultural background of arable land with crops protects the soil quite well. Extreme rainfall events (>30 mm/day) overcome the resistance of the vegetation cover and produce a large volume of soil loss, comparable to the erosive work of meltwater runoff over several years. An increase in heavy rainfall activity over the Tomsk region has been observed since 2017, along with a rise in the frequency of emergencies caused by water erosion on arable lands within agricultural landscapes.

Keywords: water erosion, soil loss, agricultural background, climate, Tomsk region

Введение

Эрозия почв сопровождает земледелие в течение всей его истории. Исследователи отмечают, что особенно возросла ее интен-

сивность в XIX–XX вв. в связи с применением механической тяги на больших по площади полях [1, с. 178]. Обусловлена эрозия почв тальми и ливневыми водами, деятель-

ностью ветра. В последние десятилетия отмечаются региональные изменения климатических факторов – температуры, осадков, оценка которых и степень влияния на почвенно-эрозионные процессы в пределах обрабатываемых земель в настоящее время еще затруднительна [2]. Изменение климатических условий наблюдается и на юго-востоке Западно-Сибирской равнины. В. П. Горбатенко (2021) [3] отмечает, что Западная Сибирь относится к регионам наибольшей скорости потепления климата, но в отдельных его частях большинство характеристик демонстрируют разные пределы изменчивости основных климатических показателей территории, ограниченных диапазоном координат 55–60° с. ш. и 65–85° в. д. В названных пределах расположена и территория Томской области, где также наблюдаются изменения климата. Так, М. А. Волкова [4, с. 11] установила, что отмечается рост температуры воздуха со скоростью 0,2–0,49 °С за 10 лет. Годовое количество атмосферных осадков в течение последних 50 лет имеет тенденцию повсеместного роста на величину от 2 мм/10 лет до 20 мм/10 лет; причем увеличилась в основном доля ливневых осадков [5]. Продолжительность залегания снежного покрова в среднем составляет 164–180 суток. Но в последние 30 лет наблюдается уменьшение продолжительности залегания, что обусловлено изменениями сроков залегания и разрушения снежного покрова [3]. Увеличение атмосферных осадков, изменение сроков залегания и разрушения снежного покрова играют важную роль в развитии водной эрозии почв как от стока талых снеговых вод, так и ливневой.

Цель исследования – анализ развития водной эрозии почв в условиях меняющегося климата, в том числе при разном состоянии агрофона.

Материалы и методы исследования

Объект исследования – бассейн р. Басандайки – правого притока р. Томь, дренирующего Томь-Яйское междуречье юго-востока Томской области (рис. 1). Площадь бассейна – 402 км², абсолютные высоты изменяются от 100 до 240 м, крутизна склонов – от 0–1 до 15° в пределах сельхозугодий и до 30–60° на склонах рек, оврагов, балок. Климат территории умеренно континентальный, среднегодовое количество осадков 568 мм [6, с. 47]. За теплый период года их выпадает до 70 % от годовой суммы. Осадки летом выпадают в основном на холодных фронтах циклонов и носят ливневый характер. Для территории характерна значительная толщина снежного покрова (40–70 см). Глубина промерзания почв изменяется по годам от 23–94 см (2008 г.) до 75–150 см (2010 г.) [7]. Почвообразующими породами в пределах Томь-Яйского междуречья являются покровные отложения среднеплейстоцен-верхнеплейстоценового возраста элювиально-делювиального генезиса с привнесом эолового материала, мощность которых изменяется от 1–2 до 10–12 м. Они быстро размокают в воде. Слабая водостойкость отложений – причина широкого развития эрозионных процессов [8]. Бассейн р. Басандайки расположен в зоне подтайги, в его пределах доминируют серые лесные, дерново-подзолистые почвы.

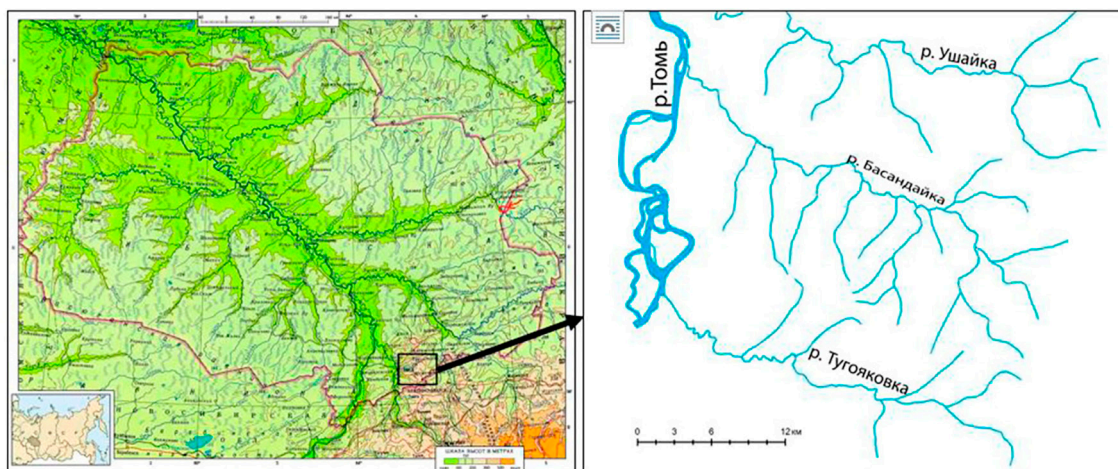


Рис. 1. Местоположение объекта исследования в пределах Томской области
Примечание: составлен З. Н. Квасниковой, М. А. Каширо по результатам данного исследования

В основу работы положены данные многолетних наблюдений (1989–2025 гг.) за эрозией почв на ключевых участках пашни в бассейне р. Басандайки (рис. 1). Наиболее детально водная эрозия изучена на полустационаре «Лучаново», где в пределах ОПХ им. Б. Н. Сидоренко площадь ключевого участка – около 100 га, из них около 54 га – пашня, из которой 30 га на склонах южной и 23 га – северной экспозиции. Остальные 46 га занимает кедровый лес. Абсолютные высоты – 120–160 м, а относительные – от 0,2–1,0 до 25–30 м. В пределах пашни преобладают склоны, близкие к прямым и выпуклым с меняющимися уклонами, местами они осложнены суффозионно-просадочными депрессиями, ложбинами; между полей вдоль склонов имеются лесополосы из сосны и березы.

На полустационаре «Лучаново» проводятся ежегодные снегосъемки в микромасштабе в конце марта; подсчет запасов влаги в снеге, рассчитывается интенсивность снеготаяния, измеряются скорости потока в микроруслах и глубины оттайки почв. После снеготаяния ежегодно обследуются микрорусла на пашне и измеряются их параметры, замеры проводились в зависимости от формы русла потока через 1–2 до 10 м. В камеральных условиях также оценивались влагозапасы в снежном покрове в соответствии со Сводом правил [9].

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ данных многолетних наблюдений на ключевых участках позволил:

выявить интенсивность развития эрозии почв от стока талых снеговых вод и влияние агрофона на нее; провести сравнительный анализ натуральных и расчетных данных по объему смыва почв со склонов; оценить объемы смыва почв со склонов с разным агрофоном ливневыми осадками. Рассмотрим данные положения в указанной последовательности.

Талая эрозия почв – сложный природно-социальный процесс, зависящий от сочетания ряда как природных, так и антропогенных факторов. Многолетние наблюдения на двух склонах пашни южной экспозиции полустационара «Лучаново» подтверждают сложность проявления процесса, так как при одних и тех же погодных условиях года смыв почв на разных участках склона пашни различается. В среднем за многолетние исследования запасы влаги в снежном покрове для пашни южного склона составили 142 мм [10], но разбиение этого ряда наблюдений на десятилетние промежутки позволило выявить крупномасштабные временные колебания: так за 1988–1997 гг. среднее значение влагозапасов составило 122 мм; за 1997–2007 гг. – 153 мм; за 2008–2017 – 152 мм и за 2018–2023 гг. – 114 мм. Но средние значения влагозапасов не отражают истинной картины этого показателя вследствие неравномерного залегания снежного покрова из-за деятельности метелей: толщина снежного покрова на пашне изменяется от 0 до 30 см (рис. 2, а) на наветренных выпуклых участках пашни – до 1,5–2,4 м в сугробах лесополос и в депрессиях рельефа (рис. 2, б).



Рис. 2. Неравномерное залегание снежного покрова Лучановского полустационара в бассейне р. Басандайки: а – на плакоре пашни (фото З. Н. Квасниковой, март 2015), б – в сугробе у лесополосы (фото М. А. Каширо, март, 2018)



Рис. 3. Промоины с порожистым руслом на пашне ключевого участка в бассейне р. Басандайки: А – апрель 2021 г., Б – март 2022 г. (фото З. Н. Квасниковой)

Такое явление, наряду с влиянием микро рельефа пашни и глубиной оттайки почв от 5 – 10 до 25–35 см, вызывает неравномерность смыва почв со склонов. Большое влияние на талую эрозию также оказывает крутизна склонов и интенсивность снеготаяния. За годы наблюдений она изменялась от 8,7–9,8 мм/сут (1997–1998 гг.) до 52,5 мм/сут, составляя в среднем 12,9–15,9 мм/сут. Наблюдения за скоростями воды в руслах микропотоков показали, что они изменяются от 0,01–0,5 до 1,5–2,0 м/с. Такие скорости способны подвергать размыву грунты, слагающие поверхность территории: допустимые неразмывающие скорости этих пород изменяются от 0,27–0,37 до 0,65–0,75 м/с. Скорости потока от 0,7–1,5 м/с на склонах крутизной 5–7° и более образуют промоины глубиной до 1,5 м с порожистым руслом (рис. 3). Наблюдения показали, что большое влияние на интенсивность развития талой эрозии оказывает состояние агрофона: наибольший смыв почвы происходит по боронованной зяби. В зависимости от длины, крутизны, формы склона, интенсивности снеготаяния, наличия ложбин, осложняющих склон, смыв изменяется от 1–5 до 20–26 м³/га.

Согласно СП (2021) [9], процесс талой эрозии почв по зяби относится к опасным (5–10 м³/га) и весьма опасным (10–15 м³/га). По грубой зяби – глубокой вспашке поперек

склона смыв почв талыми водами изменяется от 0,5–1,0 до 4–5 м³/га, лишь в 1989 г. он составил 7–8 м³/га. На склонах со сложным агрофоном (стерня, озимые, клевер, многолетние травы, скошенный лен) смыв почв относится к умеренно опасным и составляет в основном 2–5 м³/га, на отдельных участках поля – 6–7 м³/га. Большое влияние на развитие талой эрозии почв оказывают лесополосы: максимальный смыв почв происходит с обеих сторон лесополос, особенно в годы с коротким периодом снеготаяния. За период наблюдений с 1991 по 2023 г. зафиксированы объемы смыва от 11–12 м³/га в 2014 г. до 45–50 м³/га в 1992, 2010 гг. Максимальный объем смытых почв составил 81 м³/га в 2011 г. В последние 10 лет интенсивность смыва почв талыми снеговыми водами в пределах Лучановского полустационара уменьшилась до умеренно опасных значений благодаря грамотной работе агронома ОПХ им. Б. Н. Сидоренко Д. А. Савельевой, проводящей организацию сложных агрофонов на южных склонах пашни.

О ливневой эрозии почв. В теплое время года территория Томской области – очаг ливневой деятельности. За лето выпадает до 300–400 мм осадков, носящих ливневый характер, продолжительность которых изменяется от 1 мин до 7–9 ч, средняя интенсивность ливней варьирует от 0,11 до 3,0 мм/мин, но наблюдаются ливни с очень высо-

кой интенсивностью выпадения – более 5 мм/мин, они особенно опасны для развития эрозии почв. За сутки может выпасть 50–100 мм осадков [11]. Анализ суточных норм осадков показал, что за 1960–2023 гг. отмечается увеличение числа случаев выпадения ливней на исследуемой территории – Томь-Яйском междуречье. Кроме того, установлена тенденция увеличения максимальной пентадной суммы осадков после 2000 г. [12]. В отдельные годы суммы осадков, выпавших за 5 последовательных суток, могут превышать месячную норму осадков на 100 %. Выявляются ситуации, ассоциируемые с возникновением дождевых паводков. Например, 9 августа 1994 г. за 5 суток выпало 135,3 мм осадков при месячной норме 76 мм. В выпадении таких осадков прослеживается квазипериодичность (2 года и 6 лет), но предвидеть год, благоприятный для формирования экстремальных осадков на территорию, не представляется возможным [13]. Количество случаев сильных дождей (не менее 50 мм за 12 ч) меняется в пространстве и объясняется значительным влиянием локальных условий и по годам, что определяется циркуляционными факторами [14]. Все вышесказанное объясняет сложность и слабую изученность ливневой эрозии почв на юго-востоке Томской области.

Авторами данной работы для оценки эрозионных последствий ливней в агроландшафтах использованы расчетный метод и полевые наблюдения за эрозионным эффектом после выпавших 17 ливней. Эрозионный индекс осадков (R_{30}) территории составляет 4–6 единиц, он сопоставим с таковым для центральных частей европейской территории России, Урала. Для оценки потенциального смыва почв дождевыми осадками авторами проведены расчеты потенциального смыва для основных типов почв, вовлеченных в агропроизводство. Он изменяется от 1,9–3,65 т/га у серых лесных почв до 2–2,6 у темно-серых и от 1,45 до 3,95 – у светло-серых почв, но в случае сильных ливней может достигать 32,6 т/га.

Полевые наблюдения на ключевых участках «Лучаново» в течение 1987–2025 гг. показали, что сильные ливни разной продолжительности и интенсивности вызывают значительный смыв и размыв почв со склонов пашни, особенно ливни, выпадающие в течение двух суток. Максимальный смыв почв от стока ливневых вод зафиксирован авторами во время ливней 30.06.1987, когда за 5,5 ч выпало 53,7 мм и 01.07.1987 – 20,6 мм за 4 ч; на склонах крутизной 3–8°

под посадками картофеля он составил 40–100 м³/га (44–110 т/га). На этом склоне длиной 300–500 м образовались промоины и струйчатые размывы. Размеры наиболее крупной из промоин составили в длину около 200 м и глубину до 0,7 м. На коротком склоне длиной 50–100 м и крутизной 3–11° под паром смыв составил 6–7 м³/га (7–8 т/га). Показателен также пример смыва почв после ливней 03.07.2020 и 07.07.2020, когда выпало 51,0 и 21,0 мм осадков соответственно. Со склона пашни длиной 400 м и крутизной от 1 до 6° под посевами льна в стадии бутонизации и высотой до 60–70 см было смыто от 1–5 до 8–10 м³/га на разных его участках. В результате у подножия склона образовался делювиальный шлейф с толщиной делювия до 5–10 см. Наблюдения за последствиями смыва почв в течение 35 лет показали, что в случае выпадения ливней со слоем от 10 до 30 мм, но с агрофоном из стерни, посевами льна, злаковых в стадии кущения и др., смыв почв варьировал от 0,5 до 1,0 до 5–8 м³/га [15]. Таким образом, согласно СНиП (2018) процесс ливневой эрозии в зависимости от состояния агрофона изменяется от умеренно опасного 2–5 м³/га до весьма опасного – 10–15 м³/га.

Заключение

Многолетние наблюдения за эрозией в бассейне р. Басандайки показали, что на склонах крутизной более 1–2° во время снеготаяния развивается талая эрозия почв, а после сильных дождей – ливневая. В зависимости от агрофона интенсивность процесса изменяется от умеренно опасного до весьма опасного. Для защиты почв от стока талых снеговых вод следует избегать состояния на пашне боронованной зяби, так как смыв почв происходит на суглинистых почвах при уклонах 0,5–1°, а размыв – при уклонах 2° и более. При грубой зяби поперек склона смыв почв незначителен, как и по стерне, так и по всходам растений. Отмечается усиление ливневой деятельности над территорией Томской области с 2017 г. и частота вызванных ею чрезвычайных происшествий, что согласуется с общими тенденциями изменения климата. Экстремальные ливни (> 30 мм/сут и более) преодолевают сопротивление растительного покрова и производят большой объем смыва почв, который можно сравнить с эрозионной работой стока талых вод за ряд лет. При ливнях с суммой осадков менее 10–20 мм/сут агрофон пашни с посевами сельскохозяйственных культур хорошо защищает почвы.

Список литературы

1. Овчинникова Т. В., Куприенко П. С., Федянин В. И. Опасные природные процессы экзогенного происхождения. Воронеж: Воронежский гос. технический ун-т, 2007. 205 с. EDN: QKGLPB.
2. Литвин Л. Ф., Кирюхина З. П., Краснов С. Ф., Добровольская Н. Г., Горобец А. В. География динамики земельной эрозии почв Сибири и Дальнего Востока // Почвоведение. 2021. № 1. С. 136–148. DOI: 10.31857/S0032180X2101007X.
3. Горбатенко В. П. Тенденции климатических характеристик, определяющих развитие транспортной системы Западной Сибири // Динамика и взаимодействие геосфер земли: Материалы Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 100-летию подготовки в Томском государственном университете специалистов в области наук о Земле. В 3 т. (г. Томск, 08–12 ноября 2021 г.). Т. II. Томск: Томский центр научно-технической информации, 2021. С. 113–116. EDN: YAONPS.
4. Волкова М. А. Оценка изменчивости температурно-влажностного режима на территории Томской области и его влияние на радиальный прирост *Pinus Sibirica* Du Tour. автореф. дис... канд. геогр. наук. Томск, 2000. 22 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://vivaldi.nlr.ru/bd000131705/view/?#page=12> (дата обращения: 10.02.2026).
5. Барашкова Н. К., Волкова М. А., Кужевская И. В. Современный климатический режим атмосферных осадков на территории Томской области // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. 2015. № 576. С. 129–152. EDN: TODWMJ.
6. Филандышева Л. Б., Ромашова Т. В., Юркова К. Д. Географические особенности г. Томска и динамика сезонных ритмов в условиях глобального изменения климата. Томск: ТГУ, 2021. 254 с. ISBN 978-5-94621-978-2.
7. Дюкарев А. Г., Пологова Н. Н. Почвы Обь-Томского междуречья // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2011. № 3 (15). С. 16–37. EDN: ODVJWP.
8. Евсеева Н. С., Квасникова З. Н., Каширо М. А., Батманова А. С. Факторы развития и интенсивность ливневой эрозии на пашне Томь-Яйского междуречья // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. 2018. Т. 23. С. 51–63. DOI: 10.26516/2073-3402.2018.23.51.
9. СП 115.13330.2016. Геофизика опасных природных воздействий. Актуализированная редакция. М.: Стандартинформ, 2021. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456054202> (дата обращения: 07.02.2026).
10. Евсеева Н. С., Петров А. И., Каширо М. А., Квасникова З. Н., Батманова А. С., Хон А. В. Влияние рельефа и растительности на распределение снежного покрова в бассейнах малых рек // Геосферные исследования. 2017. № 4. С. 64–74. DOI: 10.17223/25421379/5/6.
11. Сморгалова А. Г. Характеристика ливневых дождей по Омской, Томской и Тюменской областям // Вопросы географии Сибири. Томск, 1976. Вып. 9. С. 30–34. EDN: WVLYAL.
12. Кужевская И. В., Горбатенко В. П., Носырева О. В., Волкова М. А., Нечепуренко О. Е., Чурсин В. В., Черedyко Н. Н. Агроклиматические характеристики земель сельскохозяйственного назначения на территории Сибирского федерального округа в условиях изменения климата // Метеорология и гидрология. 2023. № 10. С. 77–87. DOI: 10.52002/0130-2906-2023-10-77-87.
13. Кужевская И. В., Пустовалов К. Н., Шарапова А. А. Характеристики конвективных кластеров, восстановленные по данным инструментов зондирования ATOVS // Фундаментальная и прикладная климатология. 2018. Т. 2. С. 69–85. DOI: 10.21513/2410-8758-2018-2-69-85.
14. Черedyко Н. Н., Волкова М. А., Кужевская И. В., Чурсин В. В. Экстремальные летние осадки в Сибири в 2015–2021 гг. // ENVIROMIS-2022: международная конференция и школа молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды (г. Томск, 12–17 сентября 2022 г.). Томск: Томский ЦНТИ, 2022. С. 332–335. DOI: 10.5281/zenodo.7136752.
15. Евсеева Н. С., Квасникова З. Н., Кужевская И. В. Ливни как природный риск и их экологические аспекты (на примере южной части Томской области) // Геосферные исследования. 2021. № 4. С. 73–84. DOI: 10.17223/25421379/21/6.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.



**ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ФАКТОРОВ РАЗМЕЩЕНИЯ
УЧРЕЖДЕНИЙ СТАЦИОНАРНОЙ РЕКРЕАЦИИ
НИЖЕГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ
НА ОСНОВЕ ЛАНДШАФТНОГО ПОДХОДА**

¹Зайцева Ю. В. ORCID ID 0009-0009-3542-9855,

^{1,2}Асташин А. Е. ORCID ID 0000-0003-2133-0888,

¹Зайцев Л. А. ORCID ID 0009-0001-2370-556X

¹*Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Нижегородский государственный инженерно-экономический университет»,
Нижний Новгород, Российская Федерация, e-mail: astashinfizgeo@yandex.ru;*

²*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Нижегородский государственный педагогический университет им. К. Минина»,
Нижний Новгород, Российская Федерация*

Специфика международной политико-экономической и эпидемиологической обстановки последних лет спровоцировала существенное развитие внутреннего туризма в России. Эффективная координация его развития в регионах должна основываться на системном подходе, в том числе и при проведении анализа факторов, определяющих размещение учреждений стационарной рекреации. Цель исследования: выполнить пространственный анализ факторов размещения учреждений стационарной рекреации Нижегородской области на основе ландшафтного подхода. Территориальные рамки исследования: Нижегородская область. Методы проведения исследования: анализ литературы, картографический, геоинформационный, районирования, систематизации материала, описания и сравнения, статистический, балльных оценок. Применение ландшафтного подхода к анализу закономерностей размещения учреждений стационарной рекреации в Нижегородской области позволяет учитывать системные особенности территории и обеспечить эффективное использование её рекреационного потенциала. В ходе выполнения исследования было установлено, что учреждения рекреации размещены по территории региона неравномерно. Максимальная концентрация учреждений стационарной рекреации сосредоточена в зоне тайги вдоль береговой линии Горьковского водохранилища. В зоне смешанных лесов объекты рекреации тяготеют к областному центру – г. Н. Новгород, а в лесостепной зоне – к крупным рекам (Волга и Сура). Большинство учреждений сосредоточено в 100-километровой зоне вокруг г. Нижнего Новгорода, что связано с развитой инфраструктурой и близостью объектов историко-культурного наследия. Большая часть учреждений стационарной рекреации в Нижегородской области имеет пространственное тяготение к историко-культурным и крупным водным объектам и расположена на территориях с хорошей транспортной доступностью.

Ключевые слова: факторы размещения учреждений стационарной рекреации, ландшафтный подход, внутренний туризм, Нижегородская область

**SPATIAL ANALYSIS OF THE FACTORS OF THE LOCATION
OF INPATIENT RECREATION FACILITIES
IN THE NIZHNY NOVGOROD REGION BASED
ON THE LANDSCAPE APPROACH**

¹Zaitseva Yu. V. ORCID ID 0009-0009-3542-9855,

^{1,2}Astashin A. E. ORCID ID 0000-0003-2133-0888,

¹Zaitsev L. A. ORCID ID 0009-0001-2370-556X

¹ *State Budgetary Educational Institution of Higher Education
“Nizhny Novgorod State Engineering and Economic University”,
Nizhny Novgorod, Russian Federation, e-mail: astashinfizgeo@yandex.ru;*

² *Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
“Nizhny Novgorod State Pedagogical University named after K. Minin”,
Nizhny Novgorod, Russian Federation*

The specifics of the international political, economic and epidemiological situation in recent years have provoked a significant development of domestic tourism in Russia. Effective coordination of its development in the regions should be based on a systematic approach, including when analyzing the factors determining the location of inpatient recreation facilities. The purpose of the research: to perform a spatial analysis of the factors of the location of inpatient recreation facilities in the Nizhny Novgorod region based on a landscape approach. Territorial scope of the research: Nizhny Novgorod region. Research methods: literature analysis, cartographic, geoinformation, zoning, systematization of material, description and comparison, statistical, scoring. The application of a landscape approach to the analysis of patterns of placement of inpatient recreation facilities in the Nizhny Novgorod region allows us to take into account the systemic features of the territory and ensure the effective use of its recreational

potential. During the research it was found that recreational facilities are unevenly distributed throughout the region. The maximum concentration of inpatient recreation facilities is concentrated in the taiga zone along the coastline of the Gor'kovskoe reservoir. In the zone of mixed forests, recreational facilities tend to the regional center – the N. Novgorod city, and in the forest-steppe zone – to the large rivers (Volga and Sura). Most of the institutions are concentrated in a 100-kilometer zone around the Nizhny Novgorod city, due to the developed infrastructure and proximity of historical and cultural heritage sites. Most of the institutions of stationary recreation in the Nizhny Novgorod region have a spatial attraction to historical, cultural and large water bodies and are located in areas with good transport accessibility.

Keywords: factors of placement of inpatient recreation facilities, landscape approach, domestic tourism, Nizhny Novgorod region

Введение

Разнообразие объектов природного и историко-культурного наследия России создаёт значительный потенциал для развития внутреннего туризма, особенно в условиях сокращения объёмов выездного туризма из-за событий последних лет: коронавирусных ограничений, рестрикций ряда зарубежных государств в отношении России, существенно возросшей стоимости некоторых иностранных валют и обострившейся геополитической ситуации в ряде регионов мира.

Наблюдающийся рост внутреннего туристского потока определяет необходимость оптимизации туристской инфраструктуры, необходимой для эффективного удовлетворения туристских потребностей.

Глубину и достоверность результатов исследования может обеспечить только системный подход. Поскольку представленное исследование направлено на установление факторов размещения учреждений стационарной рекреации – то есть выполнение пространственно-функционального анализа, авторы опирались на принципы ландшафтного подхода. Это позволило максимально полно учитывать природные особенности региона, предопределившие характер и пространственную организацию населения и хозяйства региона, в том числе и рекреационной сферы.

Установление факторов, предопределивших пространственную организацию учреждений стационарной рекреации в Нижегородской области, имеет важное значение для развития туризма в регионе как части его экономического и социального развития.

Цель исследования: выполнить пространственный анализ факторов размещения учреждений стационарной рекреации Нижегородской области на основе ландшафтного подхода.

Материалы и методы исследования

Теоретико-концептуальной основой исследования послужили труды известных специалистов в области рекреационной

географии: В. С. Преображенского [1; 2], Ю. А. Веденина [3], заложивших теоретические основы проведения пространственного анализа факторов размещения рекреационных объектов. Кроме того, авторы опирались на труды авторитетных учёных современности: А. С. Кускова [4], М. А. Саранчи [5], В. П. Чижовой [6], во многом определивших вектор развития рекреационной географии в XXI веке. В области ландшафтного анализа основой исследования послужили работы А. Г. Исаченко [7], Ф. М. Баканиной [8]. В ходе выполнения исследования были применены следующие методы: анализ литературы, описательный, сравнительный анализ, статистический, картографический, геоинформационный, районирования, балльных оценок.

Результаты исследования и их обсуждение

Последнее десятилетие выдалось непростым для туризма как в мире, так и в России. Причиной тому послужили ограничения периода пандемии, рестрикции ряда зарубежных государств в отношении России, существенно возросшая стоимость отдельных иностранных валют, напряжённая геополитическая обстановка в определенных регионах мира и некоторые другие обстоятельства. Сложное воздействие внешних и внутренних факторов вызвало незамедлительную реакцию как туристов, так и туристского бизнеса, произошла перестройка туристских потоков как на арене международного туризма, так и внутри страны. Постпандемийный период характеризуется увеличением интереса россиян к путешествиям внутри страны [9]. К примеру, в 2022 году внутренний туризм показал рост на 15,47% по сравнению с 2021 годом и на 67,73% по отношению к 2020 году [10].

В настоящее время продолжает расширяться сетка туристских маршрутов в России. В 2022 году основными направлениями, которые выбирали российские туристы, стали (топ-10 регионов России): Краснодарский край, г. Москва и Московская область,

г. Санкт-Петербург, Крым, Татарстан, Карелия, Ставропольский край, Омская и Калужская области [10]. Тенденцией последних лет стало существенное повышение интереса туристов к ранее слабо посещавшимся территориям, имеющим слабо развитую туристскую инфраструктуру – это территории Дальнего Востока, Крайнего Севера, Сибири. Намечилась тенденция повышения спроса на активный туризм в форме сплавов по рекам, пешеходных и конных походов и пр. [11; 12].

Увеличение внутреннего туристского потока в стране требует развития инфраструктуры на привлекающих туристов

территориях, включая увеличение количества средств коллективного размещения. В 2022 г. в России был зафиксирован прирост на 2%, как самих средств коллективного размещения, так и номерного фонда [13].

Нижегородская область имеет ряд черт, способствующих росту туристского потока в регион: ландшафтное разнообразие (регион лежит в трёх ландшафтных зонах); богатая история и сравнительно высокая обеспеченность региона объектами историко-культурного наследия; относительно хорошая транспортная доступность и развитая система средств размещения.

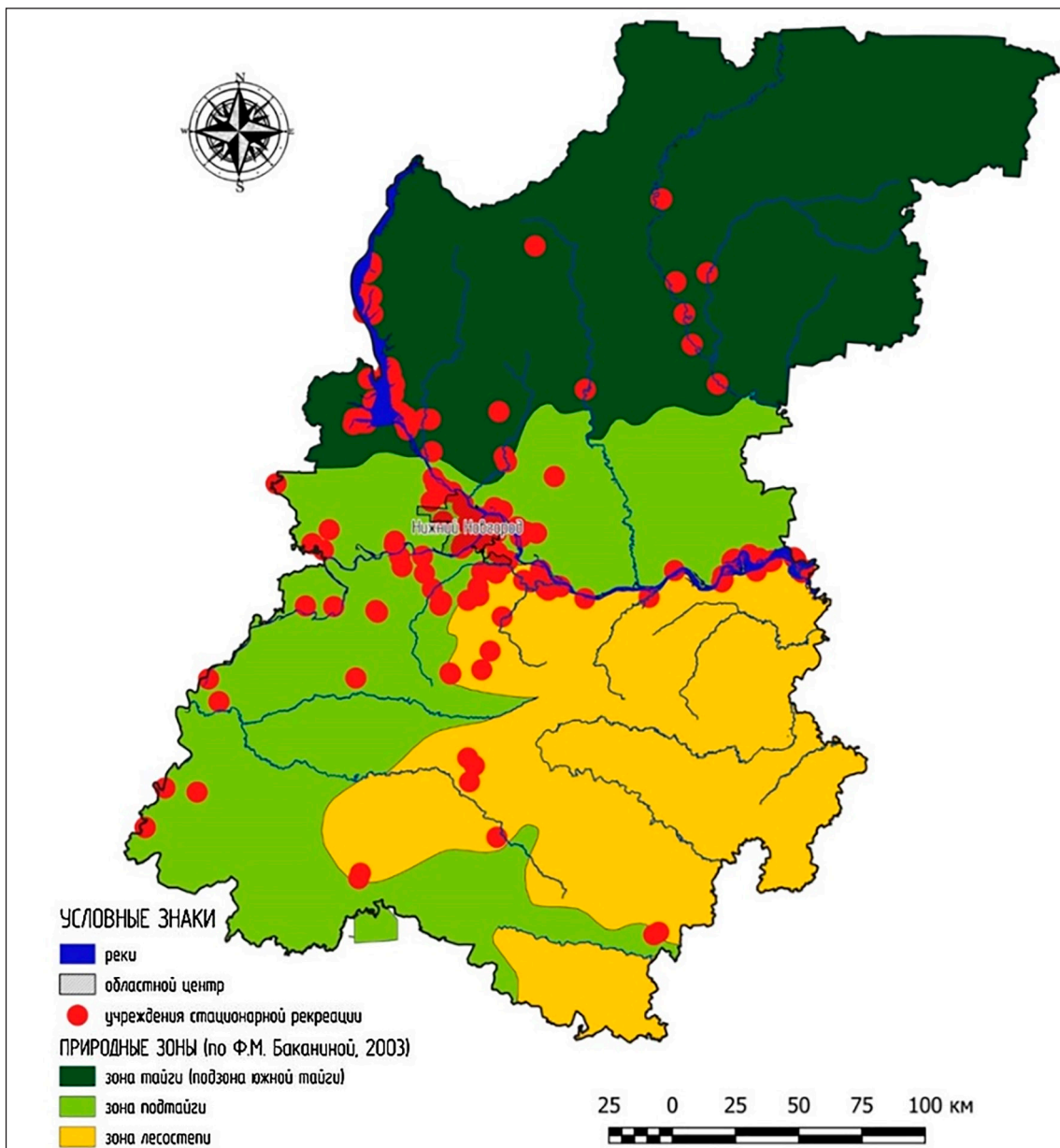


Рис. 1. Положение учреждений стационарной рекреации на карте ландшафтных зон Нижегородской области

По итогам 2022 года Нижегородская область по количеству размещенных в коллективных средствах размещения вошла в топ-10 регионов России и в топ-3 субъектов Приволжского федерального округа [14].

Очевидно, учреждения стационарной рекреации имеют определённую закономерность в пространственной организации, продиктованную уровнем обеспеченности объектами туристского интереса, сформировавшуюся под влиянием индивидуальных ландшафтных условий. Основой понимания пространственных закономерностей размещения учреждений стационарной рекреации в регионе является знание структуры и свойств его ландшафтов.

Анализ карты природных зон Нижегородской области (согласно схеме Ф. М. Баканиной [8]) показывает, что максимальная

концентрация учреждений стационарной рекреации наблюдается в зоне тайги, что обусловлено наличием здесь мощного фактора – Горьковского водохранилища (50 объектов). В зоне смешанных хвойно-широколиственных лесов учреждения стационарной рекреации тяготеют к областному центру – г. Нижний Новгород, имеющему очень важную культурную и историческую ценность (75 объектов), а в зоне лесостепи большое количество объектов рекреации тяготеет к крупным водным объектам (рекам Волга и Сура) (35 объектов) (рис. 1).

Более подробный анализ ландшафтной детерминированности размещения учреждений стационарной рекреации выполнен на уровне ландшафтных районов Нижегородской области согласно схеме Ф. М. Баканиной [8].

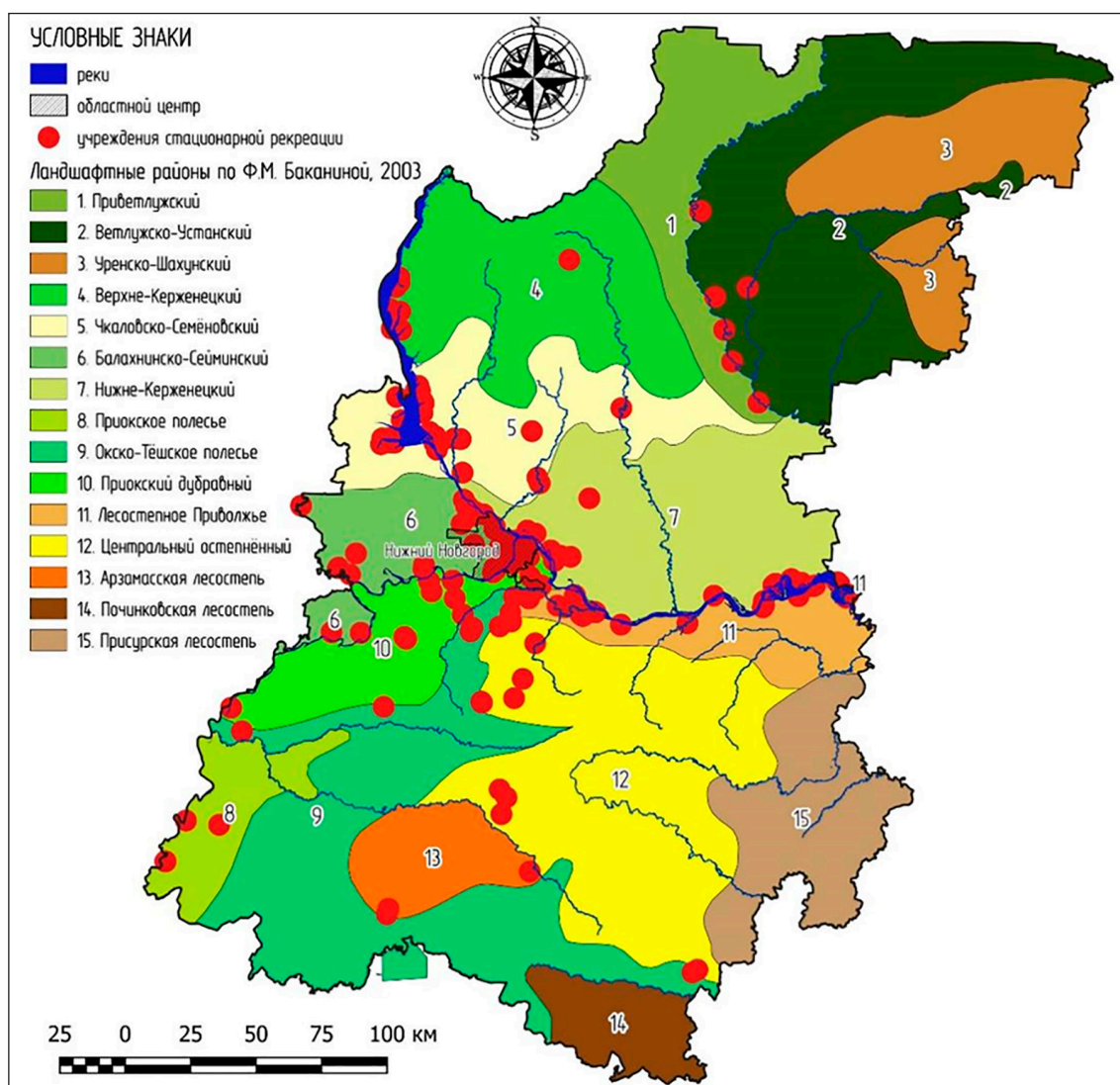


Рис. 2. Положение учреждений стационарной рекреации на карте ландшафтных районов Нижегородской области

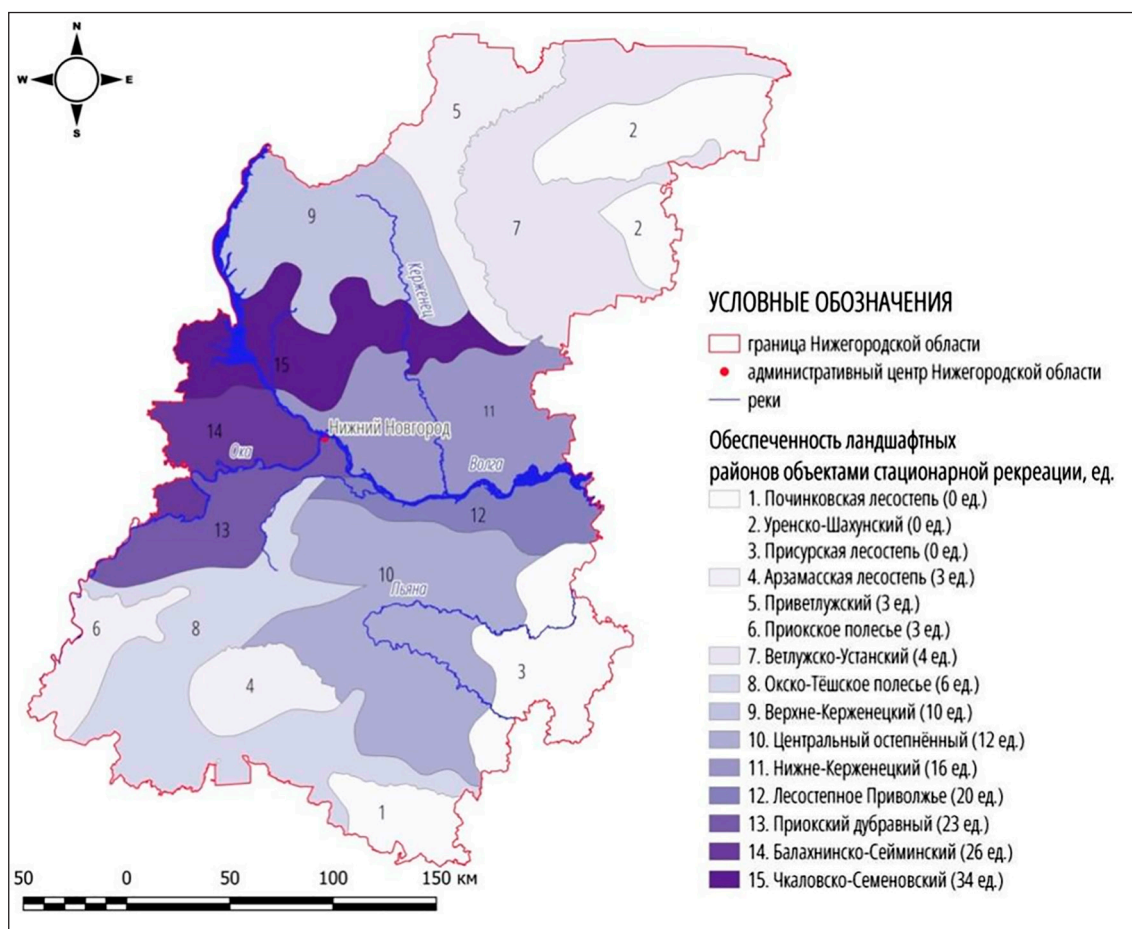


Рис. 3. Обеспеченность ландшафтных районов Нижегородской области объектами стационарной рекреации

Анализ обеспеченности ландшафтных районов Нижегородской области объектами стационарной рекреации позволяет объединить их в три группы (рис. 2, 3):

1) 10 и более единиц объектов стационарной рекреации – Приокский дубравный, Балахнинско-Сейминский, Лесостепное Приволжье, Чкаловско-Семеновский, Нижне-Керженецкий, Центральный остепнённый, Верхне-Керженецкий;

2) до 10 единиц объектов стационарной рекреации – Окско-Тёшское полесье, Приокское полесье, Арзамасская лесостепь, Ветлужско-Устанский, Приветлужский;

3) 0 объектов стационарной рекреации – Уренско-Шахунский, Присурская лесостепь, Починковская лесостепь.

Различия между ландшафтными районами, имеющими наибольшее количество учреждений стационарной рекреации, можно объяснить следующими причинами.

1. Присутствие 34 учреждений стационарной рекреации в Чкаловско-Семенов-

ском ландшафтном районе связано с наличием протяжённой береговой линии Горьковского водохранилища, а также богатым историко-культурным и природным наследием (города Городец, Семёнов и др.).

2. 26 учреждений стационарной рекреации расположено в Балахнинско-Сейминском ландшафтном районе, что объясняется близостью к областному центру, наличием богатого историко-культурного наследия (старинный город Балахна и др.) а также присутствием крупных рек – Волги и Оки, берега которых традиционно являются осью тяготения учреждений стационарной рекреации, но широкое распространение низменных заболоченных участков, характерных для данного ландшафтного района, не даёт ему возможности выйти на лидирующие позиции.

3. На третьем месте (23 объекта стационарной рекреации) Приокский дубравный ландшафтный район, который расположен на правом берегу р. Волга, на хорошо дре-

Также не имеют учреждений стационарной рекреации ландшафтные районы Присурская лесостепь и Починковская лесостепь. Так же как и Уренско-Шахунский ландшафтный район, они сильно удалены от областного центра и не имеют выхода к крупным водохранилищам, хотя по восточным границам этих ландшафтных районов протекает р. Сура. В отличие от таёжного Уренско-Шахунского ландшафтного района, лесостепные Присурская лесостепь и Починковская лесостепь испытывают чрезвычайно интенсивные антропогенные нагрузки, и если лесистость Починковской лесостепи составляет 20,5%, то лесистость Присурской лесостепи составляет всего 7% [15] – ввиду исключительно высокой распаханности территории. При таких нагрузках сохранность природной основы ландшафта, а, следовательно, и обеспеченность территории объектами природного наследия, крайне мала.

Большая часть учреждений рекреации расположена в 100-километровой зоне вокруг Нижнего Новгорода (рис. 4). Здесь концентрируется 142 из 166 учреждений стационарной рекреации, учтённых в данной работе. Это объясняется наличием Горьковского водохранилища, крупных городов, наличием хорошо развитой сети железных и автомобильных дорог.

Проведенный картографический анализ подтверждает, что большая часть объектов стационарной рекреации повторяет тенденцию их размещения в целом по стране. Они тяготеют к культурным и историческим объектам (к крупным городам), водным объектам (крупным рекам и водохранилищам), расположены на территориях с хорошей транспортной доступностью.

Заключение

Пространственный анализ размещения учреждений стационарной рекреации Нижегородской области даже на первый взгляд позволяет выявить некоторые закономерности. Во-первых, тяготение учреждений к региональному центру – что вполне естественно, поскольку именно Нижний Новгород и его агломерация концентрирует до 2/3 населения региона и, кроме того, является крупным транспортным узлом, через который в регион прибывают туристы. Всё это делает областной центр главным генератором туристского потока в регионе. Во-вторых, крупные реки и водохранилища традиционно являются осями тяготения рекреантов, а, следовательно, и учрежде-

ний стационарной рекреации. В-третьих, мощным фактором, определяющим привлекательность территории для организации стационарной рекреации, является уровень развития инфраструктуры, который в целом выше в ближних окрестностях регионального центра.

Однако наряду с очевидными факторами размещения учреждений стационарной рекреации присутствуют системные, хотя и неявно выраженные факторы, закономерно повторяющиеся в границах того или иного природно-территориального комплекса, например ландшафта или ландшафтного района. При анализе степени обеспеченности ландшафтных районов Нижегородской области учреждениями стационарной рекреации отчётливо прослеживается выраженная неравномерность этого показателя у разных ландшафтных районов. И причины такой неравномерности заключаются уже не просто в неодинаковой удалённости того или иного ландшафтного района от областного центра, а в целом комплексе ландшафтных факторов, определивших степень его привлекательности для рекреантов. Под влиянием местных ландшафтных условий либо сложилась густая сеть населённых пунктов, связывающих их дорог и многочисленных историко-культурных объектов (как правило – это хорошо дренированная территория с плодородными почвами и выходом к крупной реке), либо территория веками была безлюдной (заболоченная территория с мало плодородными почвами, не имеющая выхода к крупным рекам). Следствием многовекового безлюдья стала и современная ландшафтно-хозяйственная картина: слабо развитая инфраструктура при разреженной сети не крупных населённых пунктов с редкими объектами историко-культурного наследия. Следует отметить, что слабоосвоенные территории характеризуются гораздо большей степенью сохранности объектов природного наследия, что в некоторой степени нивелирует действие ранее перечисленных стрессоров развития сети учреждений стационарной рекреации.

Таким образом, ландшафтный подход позволяет получить более глубокое системное понимание факторов размещения учреждений стационарной рекреации на исследуемой территории, на основе которого возможно дальнейшее планирование управленческих решений, направленных на развитие туризма и рекреации в регионе.

Список литературы

1. Теоретические основы рекреационной географии / Отв. ред. В. С. Преображенский. Москва: Наука, 1975. 223 с.
2. Преображенский В. С., Веденин Ю. А., Зорин И. В., Мухина Л. И. Территориальная рекреационная система как объект изучения географических наук // Известия АН СССР. Сер. Географическая. 1974. № 2. С. 34-42.
3. Веденин Ю.А. Динамика территориальных рекреационных систем. Москва: Наука, 1982. 190 с.
4. Кусков А. С., Голубева В. Л., Одинцова Т. Н. Рекреационная география: учеб.-метод. Комплекс. Москва: Флинта: Моск. психол.-соц. ин-т, 2005 (ГУП ИПК Ульян. Дом печати). 493 с.
5. Саранча М. А., Кусков А. С. Эволюция подходов к исследованию территориальных туристско-рекреационных систем // Вестник Удмуртского университета. Серия «Биология. Науки о Земле». 2011. № 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/evolyutsiya-podhodov-k-issledovaniyu-territorialnyh-turistsko-rekreacionnyh-sistem> (дата обращения: 08.01.2026).
6. Чижова В. П. Рекреационные ландшафты: устойчивость, нормирование, управление. Московский гос. ун-т им. М. В. Ломоносова, Географический фак. Смоленск: Ойкумена, 2011. 176 с.
7. Исаченко А. Г. Ландшафтоведение и физико-географическое районирование: учебник. М.: Высш. шк., 1991. 365 с.
8. Баканина Ф. М., Пожаров А. В., Юртаев А. А. Ландшафтное районирование Нижегородской области как основа рационального природопользования // Великие реки 2003: генеральные доклады, тезисы докладов Международного конгресса. Н. Новгород: ЮНЕСКО, 2003. С. 288-290.
9. Кузнецова В. Д., Уманская М. В. Современные тенденции и пути развития внутреннего туризма России в условиях санкций // Экономика и бизнес: теория и практика. 2025. № 1-2 (119). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-tendentsii-i-puti-razvitiya-vnutrennego-turizma-rossii-v-usloviyah-sanktsiy-1> (дата обращения: 20.03.2026).
10. Батурина Н. А., Пашкевич Л. А., Власова М. В. Современные аспекты внутреннего туризма // Экономическая среда. 2023. № 4 (46). С. 92-100. DOI: 10.36683/2306-1758/2023-4-46/92-100.
11. Базаров Р. Т., Сюркова С. М., Дорошина О. П., Розанова Л. Н. Основные направления развития туристской отрасли Российской Федерации и Республики Татарстан в современных условиях // Современные проблемы сервиса и туризма. 2022. № 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osnovnye-napravleniya-razvitiya-turistskoj-otrasli-rossiyskoj-federatsii-i-respubliki-tatarstan-v-sovremennyh-usloviyah> (дата обращения: 08.03.2026). DOI: 10.5281/zenodo.7451344.
12. Иванова Н. В., Осипова Н. И. Трансформация развития внутреннего туризма России: региональный аспект // Вестник РМАТ. 2023. № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/transformatsiya-razvitiya-vnutrennego-turizma-rossii-regionalnyy-aspekt> (дата обращения: 08.03.2026).
13. Бондаренко В. А., Веприкова М. Я., Ларионов В. А., Пржедецкая Н. В. Особенности маркетинговой деятельности и управления гостиничным сектором РФ в постпандемийный период // Экономика устойчивого развития. 2023. № 4 (56). С. 35-40. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=59691539> (дата обращения: 08.03.2026).
14. Постановление Правительства Нижегородской области от 18 декабря 2023 года № 1081 «Об утверждении государственной программы Нижегородской области «Развитие туризма, промыслов и выставочно-конгрессной деятельности Нижегородской области»» URL: <https://docs.cntd.ru/document/571736566> (дата обращения: 08.03.2026).
15. Асташин А. Е., Пияшова С. Н., Соткина С. А. География Нижегородской области: физико-географические условия и природные ресурсы: монография; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный педагогический университет имени Козьмы Минина» (Мининский университет) Нижний Новгород: Изд-во Мининского ун-та; Москва: Флинта, 2020. Ч. 1. 2020. 302 с.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ПРОЦЕССОВ ХОЗЯЙСТВЕННОГО ОСВОЕНИЯ ГЕОСИСТЕМ В СТРУКТУРЕ РЕГИОНАЛЬНОГО ГЕОПОРТАЛА

Мучкаева Н. С. ORCID ID 0009-0008-8253-6883

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева», Саранск, Российская Федерация, e-mail: tosyanya2013@mail.ru

Исследование посвящено разработке алгоритмов геоэкологической оценки процессов хозяйственного освоения геосистем в структуре регионального геопортала. Актуальность работы обусловлена активным развитием цифровых технологий в сфере оценки, территориального зонирования геоэкологических рисков, для обоснования управленческих решений по территориальному планированию. Цель исследования – разработка и научное обоснование алгоритмов анализа и оценки геоэкологических процессов в условиях хозяйственного освоения геосистем на платформе регионального геопортала. Алгоритмы геоэкологической оценки процессов хозяйственного освоения геосистем разработаны на примере геопорталов семейства «Мастор»: «Метагеосистемы Мордовии. Пространственные данные региона» и «Природное и культурное наследие. Путешествуем с Русским географическим обществом», содержащих системы тематических интерактивных карт и являющихся составной частью геоинформационной системы «Мордовия». Они включают в себя энциклопедический блок и системы электронных интерактивных карт, отражающие пространственные данные о свойствах и связях природных, социальных и производственных систем региона. Практическая значимость исследования заключается в создании инструментария для комплексного мониторинга и прогнозирования изменений в геосистемах под влиянием антропогенной нагрузки. Разработанные алгоритмы позволяют автоматизировать процесс оценки, визуализировать результаты в виде картографических моделей и обеспечивать информационную поддержку при принятии решений в области рационального природопользования и устойчивого развития территории. Внедрение таких решений способствует повышению эффективности экологического управления на региональном уровне.

Ключевые слова: геосистемы, геоэкологические процессы, геоинформационные системы

DEVELOPMENT OF ALGORITHMS FOR GEOECOLOGICAL ASSESSMENT OF PROCESSES OF ECONOMIC DEVELOPMENT OF GEOSYSTEMS IN THE STRUCTURE OF A REGIONAL GEOPORTHAL

Muchkaeva N. S. ORCID ID 0009-0008-8253-6883

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «National Research Mordovian State University named after N. P. Ogarev», Saransk, Russian Federation, e-mail: tosyanya2013@mail.ru

The research is devoted to the development of algorithms for the geoeological assessment of the processes of economic development of geosystems in the structure of the regional geoport. The relevance of the work is due to the active development of digital technologies in the field of assessment, territorial zoning of geoeological risks, to justify management decisions on territorial planning. The purpose of the study is the scientific substantiation of algorithms for the analysis and assessment of geoeological processes in the context of economic development of geosystems on the platform of the regional geoport. The algorithms of geo-ecological assessment of the processes of economic development of geosystems are developed using the example of geoportals of the Mastor family: «Metageosystems of Mordovia. Spatial data of the region» and «Natural and cultural heritage. Traveling with the Russian Geographical Society», which include thematic interactive map systems, which are an integral part of the geographic information system «Mordovia», including an encyclopedic block and electronic interactive map systems reflecting spatial data on the properties and relationships of the natural, social and industrial systems of the region. The practical significance of the research lies in the creation of tools for comprehensive monitoring and forecasting of changes in geosystems under the influence of anthropogenic stress. The developed algorithms make it possible to automate the assessment process, visualize the results in the form of cartographic models and provide information support when making decisions in the field of rational use of natural resources and sustainable development of the territory. The implementation of such solutions contributes to improving the effectiveness of environmental management at the regional level.

Keywords: geosystems, geoeological processes, geoinformation systems

Введение

Современная география характеризуется глубокой цифровой трансформацией. Особую значимость в научно-практической деятельности приобретают геопорталы – цифровые платформы, обеспечивающие доступ

к пространственно-временной информации. Геопортальные системы как составные блоки региональных географических информационных систем (далее – ГИС) открыли новые перспективы развития наук о Земле, определяя эволюцию географических ис-

следований в организованную систему знаний через разработку методологии, методов и технологий по выявлению механизмов развития, динамики и функционирования природных, социальных и производственных систем и их взаимосвязи.

Геопорталы представляют собой сложные цифровые платформы, которые моделируют пространственные взаимосвязи между природными, социальными и производственными системами. Важно отметить, что их содержание напрямую отражает степень антропогенного воздействия на территорию. Как справедливо указывают исследователи, в основе формирования таких моделей лежат процессы хозяйственного освоения, которые приводят к «насыщению» ландшафта материальными ресурсами, инфраструктурой и трудом различной технологической сложности. В результате исходная природная основа подвергается трансформации, обогащаясь техногенными объектами и их инфраструктурой [1, с. 9]. При взаимодействии природных, социальных и производственных систем (далее – ПСПС) происходит активизация геоэкологических процессов, изменение качества жизни населения.

Выявление особенностей взаимодействия природы и общества, многоплановое раскрытие особенностей функционирования ПСПС служит основой для планирования хозяйственного освоения, проектирования геотехнических систем, прогнозирования динамики, функционирования и развития ПСПС, разработки и поддержки управленческих решений по оптимизации природопользования.

Цель исследования – разработка и научное обоснование алгоритмов анализа и оценки геоэкологических процессов в условиях хозяйственного освоения геосистем на платформе регионального геопортала.

Материалы и методы исследования

Важнейшим направлением современных исследований наук о Земле является разработка и внедрение региональных ГИС, что позволяет объективно диагностировать пространственно-временную структуру геосистем, оценивать и территориально зонировать геоэкологические риски, прогнозировать развитие территориальных систем, принимать обоснованные управленческие решения по территориальному планированию селитебного, сельскохозяйственного, лесохозяйственного, горно-технического, гидромелиоративного, рекреационного и природоохранного освоения [2; 3].

Для реализации системного подхода в исследовании метагеосистем необходим инструмент, объединяющий частное в целое в геосистемах, иллюстрирующий места пересечения потоков вещества, энергии и информации. Такими инструментами должны выступать аналитические и синтетические карты геосистем. Ключевыми методами для оценки состояния геосистем являются отражательно-спектральные индексы, рассчитываемые по мультиспектральным космическим снимкам. Именно они должны являться отправной точкой исследования состояния метагеосистем для принятия решений по оптимизации природопользования. Использование синтетической карты геосистем, построенной по результатам дешифрирования данных ДЗЗ, позволяет сформировать систему аналитических карт, отражающих особенности пространственно-временной организации геосистем, обеспечивающие оценку геоэкологических рисков, ландшафтно-экологическое зонирование, прогнозирование состояния геосистем, принятие и реализацию управленческих решений по оптимизации природопользования (рис. 1).

Геопортальные технологии, обеспечивая доступность информации в режиме онлайн, позволяют разрабатывать широкий спектр проектов по оптимизации природопользования. Совмещая в себе всё больше данных и сервисов, подобные разработки становятся неотъемлемым инструментом принятия управленческих решений для всех категорий пользователей [4]. Важнейшим вектором развития геопорталов является геоэкологическая оценка процессов хозяйственного освоения геосистем.

Общий алгоритм геоэкологического исследования процессов хозяйственного освоения геосистем с использованием геопортальных технологий включает инвентаризационный, аналитический, оценочный, прогнозный этапы.

Инвентаризационный: разработка базовой картографической основы для систематизации и формирования баз данных об особенностях развитии геоэкологических процессов в условиях хозяйственного освоения геосистем. Информативность электронных аналитических и синтетических карт регионального геопортала значительно возрастает с привлечением разновременных карт (генерального межевания земель (конец XVIII – начало XIX в.), военно-топографической съемки (середина XIX в.), современных топографических и тематических карт, данных дистанционного зондирования Земли (далее – ДЗЗ).



Рис. 1. Алгоритм обработки, анализа, оценки и принятия управленческих решений по оптимизации процессов хозяйственного освоения геосистем
Примечание: составлено на основе [2]

Аналитический: разработка электронных карт, раскрывающих пространственно-временную структуру геосистем, ориентированных на раскрытие процессов становления и развития ПСПС; картографирование геоэкологических процессов и локализации геоэкологических проблем в сфере взаимодействия природных, социальных и производственных систем.

Оценочный: картографическое моделирование геоэкологических ограничений и рисков проявления чрезвычайных природных и природно-техногенных чрезвычайных геоэкологических ситуаций в структуре хозяйственного каркаса и функциональное зонирование культурных ландшафтов; оценка состояния геосистем.

Прогнозный: типология геосистем и разработка концепции интегрирования процессов хозяйственного освоения в территориальные отраслевые цели развития; определение природоохранных мероприятий по минимизации геоэкологических рисков при хозяйственном освоении геосистем.

Принятие и поддержка управленческих решений: интегрированная концепция целей территориального развития процессов хозяйственного освоения геосистем с учетом геоэкологических рисков и ограниче-

ний; планирование культурных ландшафтов по отраслевым целям хозяйственного освоения.

Результаты исследования и их обсуждение

Алгоритмы геоэкологической оценки процессов хозяйственного освоения геосистем с использованием геопортальных технологий отрабатывались при разработке геопорталов семейства «Мастор»: «Метагеосистемы Мордовии. Пространственные данные региона» и «Природное и культурное наследие. Путешествуем с Русским географическим обществом», включающих тематические слои интерактивных карт. Геопорталы являются составной частью ГИС «Мордовия» – многофункциональные базы данных, включающие в себя энциклопедический блок и системы электронных интерактивных карт, отражающие пространственные данные о свойствах и связях природных, социальных и производственных систем региона [4].

Геопортал «Метагеосистемы Мордовии. Пространственные данные региона» включает тематические слои интерактивных и энциклопедических карт, раскрывающих структуру геологической среды, зоны

свободного водообмена, водный баланс и поверхностные воды, структуру почвенного покрова и особенности активизации геоэкологических процессов в условиях хозяйственного освоения геосистем.

Геопортал «Природное и культурное наследие. Путешествуем с Русским географическим обществом» содержит информацию для построения системы карт, раскрывающих особенности хозяйственного освоения геосистем, природного и культурного наследия, туристского потенциал региона: особо охраняемые природные территории (эталонные участки зональных, интразональных и а зональных геосистем), периоды хозяйственного освоения геосистем и культурное наследие региона.

Развивающаяся система баз данных регионального геопортала обеспечивает учет, паспортизацию, мониторинг природных, социальных и производственных систем, планирование мероприятий по оптимизации природопользования, прогнозирование состояния геосистем и принятие управленческих решений. Региональные ГИС и геопорталы по своей сути являются цифровыми моделями метагеосистем. Информативность баз данных и цифровых карт значительно возрастает при их комбинированном использовании в модуле слияния данных: в инженерно-экологических изысканиях – экологическом обосновании градостроительной документации, экспертизе геотехнических систем, оценке состояния агрогеосистем, разработке туристических мастер-планов, определении географического культурного кода региона для обучающихся, краеведов, туристов и путешественников, а также для развития эффективного туристского бизнеса, основанного на использовании новейших информационных технологий для создания турпродукта и его продвижения на рынке и т. п.

Анализ и оценка геоэкологического состояния ПСПС в разрабатываемых геопорталах осуществляется в «Модуле слияния данных», обеспечивающем выявление характера взаимодействия между природными, социальными и производственными системами.

Ключевым звеном регионального геопортала является синтетическая карта геосистем, которая обеспечивает типологическую систематизацию особенностей развития геоэкологических процессов в условиях хозяйственного освоения геосистем. Она является упорядоченной моделью участка географической оболочки, отражающей

особенности происхождения, развития и характер взаимодействия компонентов.

Опыт работы по разработке геопорталов семейства «Мастор» показал хорошую эффективность использования иерархии таксонов геосистем по В. А. Николаеву [5, с. 62]: разряды (макроклиматические факторы), классы (морфотектонические факторы), группы (водный и геохимический режим), типы (почвенно-биологические факторы), роды (морфоскульптурные формы рельефа и слагающие их отложения), виды (растительные ассоциации).

Для исследования процессов функционирования, динамики и развития целесообразно использовать результаты мониторинга геосистем средствами ДЗЗ. С использованием ГИС-технологий становится возможным определение спектра геоэкологических процессов: активизации развития экзогеодинамических процессов, изменений водного баланса, структуры почвенного покрова и растительности, что позволяет оценить геоэкологические риски при принятии управленческих решений в сфере оптимизации хозяйственного освоения геосистем.

Общий алгоритм геоэкологического анализа изменения состояния геосистем включает решение следующих задач [6]: 1) выбор исходных данных ДЗЗ, обладающих достаточным спектральным разрешением; 2) привязка данных к единой географической системе координат; 3) обработка материалов, направленная на устранение шумов, вызванных облачностью и иными искажениями; 4) расчет спектральных индексов различных типов для получения количественных характеристик о состоянии геосистем и их элементов, в условиях спонтанного развития и антропогенной трансформации; 5) классификация результатов расчета спектральных индексов, с учетом полевых геоэкологических исследований, соответствующих различным состояниям геосистем.

Выбор спектрального индекса или их комбинация осуществляется на основе понимания цели и задач геоэкологических исследований, комплексного охвата свойств и состояний элементов геосистем и целесообразности учета специфики их спектральных характеристик [7-9]. Результаты работы по отбору методов мониторинга динамических составляющих геосистем представлены в таблице. Каждая из метрик отражает временные особенности развития, динамики и функционирования геосистем.

Алгоритм применения методов диагностики и мониторинга пространственно-временной структуры геосистем с использованием спектральных индексов

Таксон	Основание дифференциации	Метод	Прикладное значение
Тип	Структура почвенного покрова, формации растительности	Barren Soil, Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Enhanced Vegetation Index (EVI), Agriculture (Bands 11–8–2)	Оптимизация сельского и лесохозяйственного освоения геосистем, прогнозирование экзогеодинамических процессов
		Land Surface Temperature and Emissivity (LST&E)	
		Freeze/Thaw (F/T), Burned Area Index (BAI), Aesthetic Neon, Normalized Burnt Ratio (NBR)	
Род	Морфоскульптурные формы земной поверхности, физико-механический состав горных пород и современных отложений	Geology (Bands 12–8–2), Geology (Bands 8–11–12), Short Wave Infrared RGB (SWIR)	Прогнозирование экзогеодинамических процессов, формирование систем севооборотов, поле- и почвозащитных лесных полос, противоэрозионных мероприятий
		Normalized Difference Water Index (NDWI), Normalized Difference Moisture Index (NDMI)	
		Freeze/Thaw (F/T)	
Вид	Структура растительности и животного мира	Reflectance (Color Infrared, Bands 5–4–3), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Leaf Area Index (LAI), Enhanced Vegetation Index (EVI)	Организация лесо- и сельскохозяйственного освоения территории
		Water Quality (Se2WaQ), Ulyssys Water Quality Viewer	
		Normalized Difference Moisture Index (NDMI)	

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

Использование спектральных индексов позволяет оперативно выявить особенности влияния процессов хозяйственного освоения на геоэкологическое состояние геосистем. Подбор элементарных, модифицированных и комплексных спектральных индексов происходит на основании перечня доступных космических снимков с набором требуемых спектральных диапазонов в соответствии с задачами исследования [10-12].

Данные ДЗЗ позволяют сделать временной срез состояния геосистем. В то же время следует учитывать, что спектральные индексы не обеспечивают полное видение ситуации, так как факторов, влияющих на функционирование любой геосистемы, очень много. Для детализации геоэкологических ситуаций целесообразно использовать определенные алгоритмы анализа тематических карт, баз данных и результатов полевых исследований.

В качестве примера выделения особенностей сельскохозяйственного освоения геосистем в модуле слияния данных в геопортале «Метагеосистемы Мордовии»

на рисунке 2 проведено наложение контуров выбывших из активного сельскохозяйственного оборота земель на структуру почвенного покрова. На рисунке 2 отмечается высокая зависимость состояния сельскохозяйственных земель от особенностей структуры почвенного покрова. Заращение пашни активно происходит в ареалах распространения дерново-подзолистых и серых лесных почв.

Спектральные индексы достаточно эффективны при оценке техногенной трансформации геосистем [13-15]. Источником поступления техногенного материала в водотоки является поверхностный сток с городской территории. Выпадение пыли способствует изменению химического состава городских почв, повышенному количеству Al_2O_3 , соединений Fe, Ca и Mg, органики. В почвах города развиты техногенные аномалии Pb, Cd, Cu, Zn, Mo, Sn, Hg.

В качестве примера на рисунке 3 приведены результаты геоэкологического состояния р. Саранка в историко-культурном центре столицы Республики Мордовия.



Рис. 2. Модуль слияния данных геопортала «Метагеосистемы Мордовии»: наложение контуров выбывших земель на структуру почвенного покрова



Рис. 3. Геоэкологическое состояние р. Саранка в историко-культурной зоне г. Саранск (индекс NDTI)

Для русла реки, дренирующей центральную часть города, характерна высокая мутность (и заиленность), высокий уровень загрязнения. Геохимический индекс донных отложений: Bi-Pb-Zn-SnSr-Ag-Cu-W-B-Ga.

Заключение

Для применения системного подхода в науках о Земле необходим инструмент, объединяющий частное в целое, иллюстрирующий места пересечения потоков вещества, энергии и информации, зависимость месторасположения элементов в природе. Важнейшим результатом комплексных исследований

должны выступать региональные геопорталы, в качестве центрального звена которых выступает синтетическая карта геосистем.

Региональные геопорталы – цифровые модели природных, социальных и производственных систем, призванные оптимизировать работу специалистов в сфере природопользования. Использование обоснованных алгоритмов анализа и оценки геоэкологических процессов в условиях хозяйственного освоения геосистем на платформе регионального геопортала способствует оптимизации принятия управленческих решений в сфере природопользования.

Разработка и внедрение алгоритмов геоэкологического анализа интерактивных электронных карт геопортала для планирования процессов хозяйственного освоения геосистем имеет следующие преимущества: оперативность, открытость, визуальность.

Практические рекомендации могут быть использованы при разработке стратегий устойчивого развития на республиканском и муниципальном уровнях управления, создании схем территориального планирования, градостроительной документации, оптимизации регионального землеустройства и землепользования, мастер-планов туристско-рекреационного освоения культурных ландшафтов.

Список литературы

1. Ямашкин А. А., Ямашкин С. А., Зибров Г. В., Закусилов В. П., Зарубин О. А., Мучкаева Н. С. Геоэкологический анализ и прогноз хозяйственного освоения подземных вод // Успехи современного естествознания. 2020. № 8. С. 83-91. URL: <https://natural-sciences.ru/article/view?id=37462> (дата обращения: 12.01.2026). DOI: 10.17513/use.37462.
2. Ямашкин А. А., Ямашкин С. А. Управление территориальными системами культурного ландшафта // Инженерный вестник Дона. 2023. № 3. С. 171-181. URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n3y2023/8267> (дата обращения: 12.01.2026).
3. Кошкарев А. В. Образовательные геопорталы: данные и сервисы // Геодезия и картография. 2017. Т. 78, № S17-1. С. 33-40. URL: https://geocartography.ru/scientific_article/2017_33-40 (дата обращения: 12.01.2026). DOI: 10.22389/0016-7126-2017-33-40.
4. Ямашкин А. А., Фролов А. Н., Ямашкин С. А. Базовые геоинформационные ресурсы для оптимизации регионального землепользования // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. 2016. № 12 (143). С. 72-76. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/bazovye-geoinformatsionnyeresursy-dlya-optimizatsii-regionalnogo-zemlepolzovaniya> (дата обращения: 12.01.2026). DOI: 10.18454/IRJ.2016.53.009.
5. Николаев В. А. Ландшафтоведение: семинарские и практические занятия. Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Географический факультет МГУ, 2006. 208 с. URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_003018103/. (дата обращения: 12.01.2026). ISBN: 5-89575-103-2.
6. Ямашкин А. А., Ямашкин С. А., Шабайкина В. А. Проектирование и разработка геопортальных систем для обеспечения поддержки процессов принятия управленческих решений в области устойчивого развития регионов // Вестник ВГУ. Серия: География. Геоэкология. 2024. № 4. С. 38-44. URL: <https://journals.vsu.ru/geo/article/view/12696> (дата обращения: 12.01.2026). DOI: 10.17308/geo/1609-0683/2024/4/38-44.
7. Ямашкин А. А., Ямашкин С. А., Шабайкина В. А., Зарубин О. А., Кирушин А. В. Геоинформационное моделирование метагеосистем города для принятия управленческих решений в сфере экологии // Успехи современного есте-

ствознания. 2023. № 8. С. 76-85. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=38091> (дата обращения: 02.03.2026). DOI: 10.17513/use.38091.

8. Денисова А. Ю., Егорова А. А., Сергеев В. В., Кавеленова Л. М. Выработка требований к мультиспектральным данным дистанционного зондирования Земли в задаче экспертизы зарастания пахотных земель древесно-кустарниковой растительностью // Компьютерная оптика. 2019. Т. 43. № 5. С. 846-856. URL: https://www.researchgate.net/publication/337291787_Requirements_for_multispectral_remote_sensing_data_used_for_the_detection_of_arable_land_colonization_by_tree_and_shrubbery_vegetation (дата обращения: 20.01.2026). DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-5-846-856.

9. Кравцова В. И., Тутубалина О. В., Зимин М. В. Дистанционное зондирование в географических исследованиях: основные достижения лаборатории аэрокосмических методов и перспективные направления развития // Вопросы географии. 2017. № 144. С. 306-331. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=osaggf> (дата обращения: 20.01.2026). EDN: OSAGGF.

10. Савин И.Ю., Шишкин М.А., Шарычев Д.В. Особенности спектральной отражательной способности фракций образцов почв размером от 20 до 5 000 мкм // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2022. № 112. С. 24-47. URL: <https://bulletin.esoil.ru/jour/article/view/716> (дата обращения: 20.01.2026). DOI: 10.19047/0136-1694-2022-112-24-47. EDN: TLMGQW.

11. Терехин Э. А. Особенности спектрально-отражательных характеристик и возможности распознавания естественных ландшафтов лесостепей на основе спутниковых данных Sentinel-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 6. С. 195-207. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=mzshkf> (дата обращения: 20.01.2026). DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-195-207.

12. Ямашкин А. А., Ямашкин С. А., Байчуринов М. Р., Токарев А. А., Лямзина И. С. Тестовые полигоны для диагностики состояния геосистем и развития методов интерпретации данных дистанционного зондирования Земли // Вестник ВГУ. Серия: География. Геоэкология. 2022. № 4. С. 4-18. URL: <https://journals.vsu.ru/geo/article/view/10820> (дата обращения: 20.01.2026). DOI: 10.17308/geo/1609-0683/2022/4/4-18.

13. Терехин Э. А. Влияние лесистости залежных земель лесостепи на спектрально-отражательные характеристики по данным Sentinel-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 4. С. 223-235. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49442876> (дата обращения: 20.01.2026). DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-223-235.

14. Елсаков В. В., Щанов В. М. Спутниковые методы в анализе изменений экосистем бассейна р. Вычегда // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 4. С. 135-145. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26703041> (дата обращения: 20.01.2026). DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-13-135-145.

15. Медведев А. А., Тельнова Н. О., Кудиков А. В. Дистанционный высокодетальный мониторинг динамики зарастания заброшенных сельскохозяйственных земель лесной растительностью // Вопросы лесной науки. 2019. Т. 2. № 3. С. 1-12. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/distantionnyi-vysokodetalnyi-monitoring-dinamiki-zarastaniya-zabroshennyh-selskohozyai-stvennyh-zemel-lesnoi-rastitelnostyu/viewer> (дата обращения: 20.01.2026). DOI: 10.31509/2658-607x-2019-2-3-1-12.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.



РЕЗУЛЬТАТЫ АЭРОПАЛИНОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ГОРОДА БАРНАУЛА ЗА 2025 ГОД

Стребкова А. С. ORCID ID 0000-0003-2869-5599,
Ненашева Г. И., Карманова М. В.

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Алтайский государственный университет», Барнаул, Российская Федерация,
e-mail: strebkova_a@mail.asu.ru*

В статье рассматриваются результаты аэропалинологического мониторинга на территории г. Барнаула в весенне-летний период 2025 г. Актуальность исследования обусловлена неуклонным ростом распространенности поллинозов, которыми в России страдают до 30 % населения, и необходимостью систематического наблюдения за составом пыльцевого дождя как основным фактором развития сезонных аллергий. Цель работы заключалась в анализе качественного и количественного состава пыльцы аллергенных растений в атмосфере г. Барнаула и составлении календаря пыления. Исследование проводилось с использованием стандартной волюметрической методики с применением пыльцеуловителя Буркарда. Ежедневный отбор проб с апреля по сентябрь позволил проанализировать более 160 образцов и идентифицировать 14 таксонов аллергенной пыльцы. Установлено, что общая годовая концентрация пыльцы составила 31532 п.з./м³. Сезон пыления отчетливо разделился на три волны. Первая волна пыления характеризовалась доминированием березы (*Betula* sp.), обеспечившей 59,5 % от общего объема пыльцы с пиком концентрации 2808 п.з./м³ 5 мая. Во вторую волну пыления преобладали сосна (*Pinus* sp.) и злаки (Poaceae). Третья волна пыления отличалась наибольшим разнообразием с участием полыни (*Artemisia* sp.), маревых (Chenopodiaceae) и крапивы (*Urtica* sp.). Выявлена четкая зависимость динамики пыления от метеорологических условий: засушливая и ветреная погода способствовала росту концентраций, тогда как обильные осадки приводили к временному очищению воздуха. Полученные результаты подчеркивают необходимость регулярного аэропалинологического мониторинга для своевременного оповещения населения о периодах высокого аллергенного риска и могут служить основой для оптимизации лечебно-профилактических мероприятий.

Ключевые слова: аэропалинологический мониторинг, календарь пыления, пыльцеуловитель Буркарда, аллергенные растения, поллиноз

THE RESULTS OF AEROPALINOLOGICAL MONITORING OF BARNAUL IN 2025

Strebkova A. S. ORCID ID 0000-0003-2869-5599,
Nenasheva G. I., Karmanova M. V.

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
“Altai State University”, Barnaul, Russian Federation,
e-mail: strebkova_a@mail.asu.ru*

The article discusses the results of aeropalino logical monitoring in Barnaul in the spring-summer period of 2025. The relevance of the study is due to the steady increase in the prevalence of pollinosis, which affects up to 30 % of the population in Russia, and the need for systematic monitoring of the composition of pollen rain as the main factor in the development of seasonal allergies. The purpose of the work was to analyze the qualitative and quantitative composition of pollen of allergenic plants in the atmosphere of Barnaul and compile a pollination calendar. The study was conducted using a standard volumetric technique using a Burkard pollen trap. Daily sampling from April to September made it possible to analyze more than 160 samples and identify 14 taxa of allergenic pollen. It was found that the total annual pollen concentration was 31532 p.g/m³. The dusting season was clearly divided into three waves. The first wave of pollination was characterized by the dominance of birch (*Betula* sp.), which provided 59.5 % of the total pollen volume with a peak concentration of 2808 p.g/m³ on May 5. In the second wave of dusting, pine (*Pinus* sp.) and cereals (Poaceae) prevailed. The third wave of dusting was most diverse, involving wormwood (*Artemisia* sp.), haze (Chenopodiaceae), and nettle (*Urtica* sp.). A clear dependence of dust dynamics on meteorological conditions was revealed: arid and windy weather contributed to an increase in concentrations, while heavy precipitation led to temporary air purification. The obtained results emphasize the need for regular aeropalino logical monitoring in order to timely notify the population about periods of high allergenic risk and can serve as a basis for optimizing therapeutic and preventive measures.

Keywords: aeropalino logical monitoring, pollination calendar, allergenic plants, Burkard’s pollen trap, pollinosis

Введение

В последние годы значимость аэропалинологических исследований заметно увеличивается, что напрямую связано с ростом распространенности аллергических заболе-

ваний. Согласно данным эпидемиологических исследований, количество людей, страдающих аллергией, увеличивается на 20 % каждое десятилетие. В Российской Федерации заболеваемость поллинозом достига-

ет 30 % [1]. Эта тревожная динамика объясняет повышенное внимание к изучению пылевого дождя, как основного фактора развития сезонных аллергий, в частности поллинозов. Для эффективного контроля состояния населения и планирования профилактических мероприятий требуется систематическое наблюдение за аллергенным фоном. Такой мониторинг включает определение количественных и качественных характеристик пыльцы в воздухе, изучение сезонных закономерностей ее появления, фиксацию суточной активности пыления наиболее значимых растений, составление календарей пыления и формирование прогнозов. Все эти задачи решает аэропаллинология – научное направление, специализирующееся на оценке содержания пыльцы растений и спор грибов в атмосфере. Эпидемиологические исследования показывают, что наибольшая заболеваемость поллинозом регистрируется в возрастной группе 20–40 лет (56 %). Ведущим клиническим проявлением заболевания служит аллергический ринит (95–98 %), который в более чем 90 % случаев сочетается с аллергическим конъюнктивитом, а в 32–49 % случаев приводит к развитию бронхиальной астмы [2; 3]. Важной особенностью пылевых антигенов является их высокая ферментативная активность, которая влияет на трансформацию аллергена в организме и повышает его аллергенный потенциал, приводя к образованию специфических антител [4].

История инструментальных аэропаллинологических наблюдений в странах Западной Европы берет начало в конце 1970-х гг. Ключевым этапом стало создание в следующем десятилетии общеевропейского банка данных, который послужил основой для построения карт пылевой нагрузки и системы прогнозирования. Развитие системы аэропаллинологических исследований связано с созданием Международной ассоциации аэриологов (IAA) и единой европейской аэропаллинологической сети (EAN), которая насчитывает свыше 500 станций аэропаллинологического мониторинга [1]. Аэропаллинологический мониторинг предложено вести за 15 таксонами, выбор их обусловлен аллергенными свойствами и частотой встречаемости.

В России служба аэропаллинологического мониторинга существует с 1992 г., основные станции мониторинга сосредоточены в центральной полосе России. Географически сеть наблюдений тяготеет к центральной полосе страны, при этом государствен-

ная программа аэропаллинологического мониторинга до настоящего времени не реализована. Вместе с тем исследования аэроспектров продолжают, о чем свидетельствуют изданные календари пыления для Москвы, Рязани, Уфы, Петрозаводска, Ростова-на-Дону и Краснодара [5; 6]. Аэропаллинологические исследования в Алтайском крае (г. Барнаул) начали осуществляться с 2004 г., работа проводится по стандартной методике с использованием волюметрического пылеуловителя Буркарда, что дает возможность количественно оценить интенсивность пыления. Непрерывный характер аэропаллинологических исследований выступает необходимым условием для построения системы информирования о концентрации спор и пыльцы в атмосферном воздухе. Получаемые в ходе мониторинга данные обеспечивают возможность объективной оценки аллергенной обстановки, что, в свою очередь, является основой для разработки научно обоснованных управленческих решений, направленных на снижение рисков для здоровья. Практическая реализация результатов исследований способствует как профилактике обострений у лиц, страдающих аллергическими заболеваниями, так и повышению эффективности превентивных и терапевтических мероприятий, проводимых специалистами.

Цель исследования – выявление особенностей качественного и количественного состава пылевого дождя в г. Барнауле, определение основных периодов пыления региональной растительности и разработка регионального календаря пыления.

Материалы и методы исследования

В статье представлены результаты аэропаллинологического мониторинга на территории г. Барнаула в 2025 г. и составлен календарь пыления аллергенных растений. Для выполнения исследования использованы методы аэропаллинологического анализа. Стационарный аэропаллинологический мониторинг проводился с использованием волюметрической ловушки-пылеуловителя Буркарда, установленного на крыше здания Алтайского государственного университета на высоте 22 м от поверхности земли (53.347938 с. ш., 83.775149 в. д.). Аэропаллинологические исследования осуществлялись в ежедневном режиме в течение весенне-летнего сезона – с апреля по середину сентября 2025 г. Всего было получено и обработано свыше 160 проб. Подготовка препаратов к микроскопии включала их

консервацию с применением глицерин-желатиновой среды, окрашенной сафранином. Микроскопический анализ препаратов с целью подсчета и видовой идентификации пыльцевых зерен выполнялся с использованием микроскопа Axiostar plus (увеличение $\times 400$, $\times 600$). Морфологическая идентификация нативных пыльцевых зерен в аэропалинологических исследованиях ограничена вследствие значительного сходства ультраструктуры у таксономически близких видов. В связи с этим таксономическая атрибуция в большинстве случаев возможна с точностью до рода, а для отдельных групп – до семейства. Достоверная оценка концентрации пыльцевых зерен в образце достигается при условии просмотра не менее 20 % от общей площади препарата, пыльца аллергенных растений определялась с использованием эталонных препаратов рецентной пыльцы, атласов-определителей [7, с. 31; 8]. Полученные количественные данные пересчитывали на объем воздуха и выражали в виде числа пыльцевых зерен в 1 м^3 .

Результаты исследования и их обсуждение

Для анализа динамики пыления по каждому таксону фиксировали даты начала и окончания пыления, его продолжительность и дату пиковой концентрации. Календарь пыления создается по каждой декаде периода пыления. Для регионального календаря пыления были отобраны 14 аллергенных таксонов, пыльцевые зерна которых присутствуют в составе аэроспектра в значительном количестве: I группа – деревья: хвойные *Picea* sp., *Pinus* sp.; лиственные: *Salix* sp., *Betula* sp., *Populus* sp., *Acer* sp., *Ulmus* sp., *Tilia* sp.; II группа – злаковые травы: Poaceae; III группа – сорняки: *Rumex* sp., *Plantago* sp., *Urtica* sp., *Artemisia* sp., Chenopodiaceae.

Аэропалинологические спектры, полученные в результате мониторинга, служат надежным отражением сезонной динамики пыления растений на исследуемой территории. Особенностью формирования этих спектров является их прямая зависимость от метеорологических условий, которые определяют наступление фенологических фаз развития растений. Современные исследования отмечают устойчивую тенденцию к изменению сроков пыления, а также отмечается удлинение сезона пыления аллергенных растений и более раннее начало палликации. Указанные фенологические сдвиги

подчеркивают важность учета метеорологических параметров при анализе сезонной динамики пыления.

Особенности климата Барнаула тесно связаны с его физико-географическим положением: город расположен в зоне сочленения юго-восточной окраины Западной Сибири и горного сооружения Алтая. Регион характеризуется свободным доступом арктических воздушных масс со стороны Северного Ледовитого океана, а также воздушных потоков, формирующихся над территорией Казахстана и Средней Азии [9]. Трансформация и смена воздушных масс приводят к высокой вариабельности метеорологических условий. Тип климата – умеренно континентальный. Отличительные черты: зима отличается суровостью и продолжительностью, лето – непродолжительное, умеренно жаркое. Температурный режим характеризуется – в июле $+19,8 \text{ }^\circ\text{C}$, в январе $-17,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Годовой диапазон средних месячных температур составляет $37,3 \text{ }^\circ\text{C}$. Среднегодовое количество осадков – 495 мм . В структуре годового хода атмосферных осадков выделяется холодный период (ноябрь – март) с суммой 171 мм , на теплый период приходится основная доля осадков – 324 мм (65 % от общего количества). Территория города относится к зоне недостаточного увлажнения [10; 11]. Наступление фаз развития растений в значительной степени зависит от температуры воздуха. Поэтому для определения и обоснования начала периода пыления были рассчитаны временные границы наступления фаз весенне-летнего сезона (табл. 1, 2).

Для выделения фаз весенне-летнего сезона использованы температурные критерии Н. В. Рутковской, адаптированные Н. Ф. Харламовой для Алтайского края [10, с. 59–94]. При структурировании весеннего сезона выделены три фазы: «снеготаяние» – от устойчивого перехода среднесуточной температуры через $-5 \text{ }^\circ\text{C}$ к $0 \text{ }^\circ\text{C}$, «последзимье» – от 0 до $+5 \text{ }^\circ\text{C}$, «предлетье» – от устойчивого перехода через $+5 \text{ }^\circ\text{C}$ до стабильного превышения $+10 \text{ }^\circ\text{C}$. Летний сезон включает фазы «умеренно прохладное лето» (от $+10$ до $+15 \text{ }^\circ\text{C}$), «умеренно теплое лето» (выше $+15 \text{ }^\circ\text{C}$) и «спад лета» (от снижения с отметки выше $+15 \text{ }^\circ\text{C}$ до $+10 \text{ }^\circ\text{C}$). Определение даты устойчивого перехода среднесуточной температуры воздуха через $0, 5, 10, 15 \text{ }^\circ\text{C}$ проводится при сопоставлении сумм положительных и отрицательных отклонений среднесуточной температуры от данного периода [12].

Таблица 1

Даты начала фаз устойчивого перехода через -5, 0, 5, 10 и 15 °С, построенные по средним и медианным значениям за период с 1994 по 2025 г.

Фаза	Ранняя		Поздняя		Средняя		Амплитуда	σ
	№ дня	Дата	№ дня	Дата	№ дня	Дата		
- 5 °С	58	27.02.2008 27.02.2019	90	30.03.1996	75	16.III	32	10
0 °С	74	15.03.2014	111	21.04.2023	92	02.IV	37	9
5 °С	89	30.03.2014	127	07.05.2006	107	17.IV	38	9
10 °С	107	16.04.2016	144	24.05.2010	123	02.V	37	8
15 °С	125	05.05.2001	185	04.07.2009	149	28.V	60	13

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

Таблица 2

Даты завершения фаз устойчивого перехода через - 5, 0, 5, 10 и 15 °С, построенные по средним и медианным значениям за период с 1994 по 2025 г.

Фаза	Ранняя		Поздняя		Средняя		Амплитуда	σ
	№ дня	Дата	№ дня	Дата	№ дня	Дата		
15 °С	224	11.08.1996	258	14.09.2012	242	30.VIII	34	9
10 °С	239	26.08.1996	277	04.10.2006 04.10.2009	262	19.IX	38	9
5 °С	265	22.09.2017	296	23.10.2005	282	09.X	31	9
0 °С	285	11.10.2016	322	18.11.2010	304	31.X	37	9
- 5 °С	295	21.10.1996	351	17.12.2013	318	13.XI	56	11

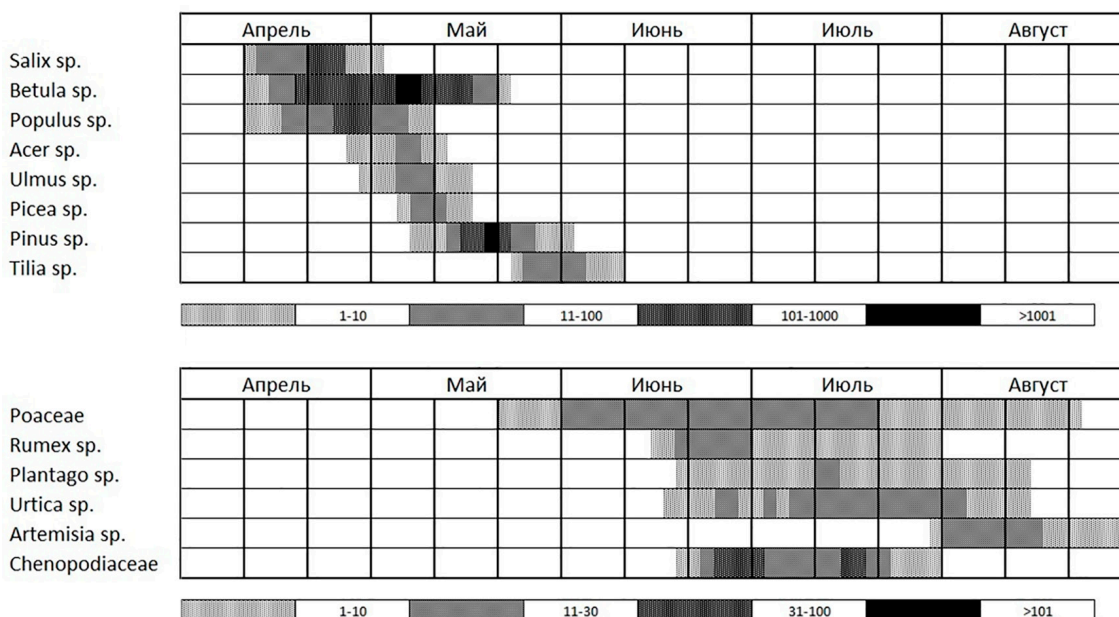
Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Для установления и анализа изменения временных характеристик весенне-летнего сезона года на исследуемой территории использованы обобщенные данные многолетних наблюдений за среднесуточными значениями температуры воздуха по метеостанции Барнаул из базы данных ВНИИГ-МИ-МЦД за период с 2004 по 2025 г. [13].

Проведенный анализ показал, что фенологическая структура весенне-летнего сезона в Барнауле характеризуется устойчивой динамикой температурных переходов. Ключевой границей, определяющей начало вегетации и активизации пыления растений, является фаза «предлетья» (устойчивый переход через +5 °С). Согласно полученным данным (табл. 1, 2), среднесуточная дата наступления «предлетья» приходится на 17 апреля (107-й день года), хотя в отдельные годы (например, аномально теплый 2014 г.) дата может смещаться на конец марта. Именно с переходом среднесуточных температур воздуха через +5 °С запускаются процессы сокодвижения у деревьев и набухания почек, что приводит к интенсивному

накоплению сумм положительных температур, необходимых для выхода пыльцевых зерен. Дальнейшее повышение температур до +10 и +15 °С (фазы летнего сезона) последовательно включает в процесс пыления таксоны растений. Данная закономерность легла в основу построения календаря пыления (рисунок), где даты начала пыления различных растений сопоставлены с описанными фазами весенне-летнего сезона.

Календарь пыления, являющийся ключевым инструментом для анализа динамики концентрации пыльцы в атмосфере, базируется на многолетних фенологических наблюдениях или на обобщенных и текущих аэропалинологических данных [14; 15]. Он формируется путем анализа пыльцевого спектра и характеризует актуальное состояние воздуха, отражая суточную сумму концентраций пыльцы отдельных аллергенных таксонов, а также периоды повышенного и пониженного процесса пыления. В календаре четко визуализируются основные периоды пыления аллергенных растений через динамику концентрации их пыльцы.



Календарь пыления Барнаула за 2025 г.

Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Календарь пыления за 2025 г. приводится на рисунке. Календарь пыления включает 14 таксонов, которые представлены в растительности г. Барнаула и Алтайского края. Для лесостепной зоны Алтайского края характерно наличие трех волн пыления в весенне-летний период [9].

Первая волна пыления (апрель – май) характеризуется максимальными концентрациями пыльцы в атмосфере г. Барнаула. В основе аэроспектра группы древесных лиственных растений: ивы, березы, тополя, клена, вяза. Для первой волны пыления характерна высокая интенсивность, начало и характер пыления данных таксонов в значительной степени определяются температурным фактором. В составе спектра доминируют пыльцевые зерна березы, в меньшей степени тополя и клена. Вторая волна пыления наблюдается с конца мая до середины июля и характеризуется минимальными концентрациями пыльцы и сравнительно бедным таксономическим составом спектра, включающим пыльцу сосны, липы и злаков как индикаторов сезона. Концентрация и время появления пыльцы сосны и злаков могут варьировать. В спектре также могут присутствовать единичные зерна розоцветных, ели, пихты, а также единичные пыльцевые зерна ивы, березы, клена. Третья волна охватывает период с середины июля до конца лета и отличается наибольшим таксономическим разнообразием. В соста-

ве аэроспектра третьей волны пыления встречаются сложноцветные, гречишные, гвоздичные, капустные, бобовые и другие семейства, при этом обязательными компонентами являются пыльцевые зерна семейства злаковых и маревых. Палиноиндикаторами третьей волны пыления выступают маревые и полынь [7, с. 38–39].

Аэропалинологический сезон 2025 г. в Барнауле также отчетливо разделяется на три последовательные волны пыления, каждая из которых характеризовалась своим доминирующим составом таксонов и специфическими метеорологическими условиями. Общая годовая концентрация пыльцы составила 31532 п.з./м³. Первая волна пыления (апрель – май) – в спектре встречается только пыльца древесных растений *Salix sp.*, *Betula sp.*, *Populus sp.*, *Acer sp.*, *Ulmus sp.* Береза – абсолютный доминант первого периода сезона пыления. Ее пыление было зарегистрировано в период с 12 апреля по 21 мая. Данный таксон обеспечил 59,5 % от всей учтенной аллергенной пыльцы года. Суммарная концентрация за сезон составила 17345 п.з./м³. Следующим по концентрации таксоном первой волны пыления выступает *Acer sp.* Пыление началось 16 апреля и продолжалось до 11 мая, достигнув пика 29 апреля (451 п.з./м³). Суммарная концентрация 1924 п.з./м³ составила 6,1 % от общей суммы годовой концентрации. Важно отметить, что пик пыления клена в 2025 г.

практически совпал с началом пика пыления березы, создав период комбинированной аллергенной нагрузки в конце апреля – начале мая. Период пыления тополя был зафиксирован с 11 апреля по 8 мая. Максимальная концентрация – 367 п.з./м³ 28 апреля. Суммарный вклад за сезон (1620 п.з./м³) составил около 5,1 %. Пыление ивы было кратковременным, но интенсивным. Период с 12 по 30 апреля. Максимальная концентрация – 172 п.з./м³ 21 апреля. Несмотря на короткий сезон, таксон обеспечил 2,9 % годовой концентрации (938 п.з./м³), выступив одним из первых весенних аллергенов. Пыление вяза проходило в период с 2 по 27 мая. Максимальная концентрация составила 27 п.з./м³ (6 мая). Общий вклад таксона в спектр (192 п.з./м³) минимален (0,6 %).

Формированию первой волны пыления способствовали ранние фенологические сроки, обусловленные быстрым накоплением эффективных температур выше +5 °С уже в начале апреля. Дни с максимальными концентрациями пыльцы (конец апреля – начало мая) характеризовались теплой и сухой погодой с умеренным ветром. Например, 5 мая зарегистрирована максимальная концентрация березы – 2808 п.з./м³ среднесуточная температура воздуха составила +14,9 °С, осадков 0 мм, относительная влажность 38,1 %, ветер до 3,1 м/с. Данные метеорологические условия благоприятны для выброса, дисперсии и переноса легкой пыльцы ветроопыляемых деревьев. Низкая относительная влажность воздуха препятствовала осаждению пыльцы, а умеренный ветер обеспечивал ее распространение.

Вторая волна пыления (конец мая – начало июля). Индикаторами второй волны выступали пыльцевые зерна *Pinus sp.* и *Poaceae*. Несмотря на более низкие абсолютные концентрации по сравнению с березой, пыльца сосны и злаков создавала устойчивый фон аллергенной нагрузки. В составе аэроспектра, за исключением перечисленных таксонов, отмечено присутствие пыльцевых зерен *Tilia sp.*, *Picea sp.*, из травянистой группы аллергенных таксонов присутствовали пыльцевые зерна *Chenopodiaceae*, *Rumex sp.*, *Urtica sp.*, *Plantago sp.* Доля сосны от суммарной концентрации за весенне-летний сезон составила 16,4 %. Пыление отмечалось с 7 мая по 26 мая. Максимум концентрации был зафиксирован значительно раньше, чем в предыдущем году – 18 мая (1277 п.з./м³). Общая сезонная концентрация 5170 п.з./м³. Пыление ели было зафиксировано с 17 по 28 мая. Максимальная кон-

центрация составила 36 п.з./м³ 9 мая. Вклад в общий спектр 0,57 %. Пыление липы отмечено в период с 17 июня по 6 июля, максимальная концентрация 39 п.з./м³.

Таксоны семейства *Poaceae* демонстрировали самый продолжительный период присутствия пыльцы в воздухе (с 30 мая по 30 августа). Интенсивность пыления была умеренной со средними концентрациями. Максимальная концентрация отмечена 14 июня (32 п.з./м³). Суммарный вклад за сезон (934 п.з./м³) составил 3 %.

Метеорологические условия второй волны пыления характеризовались теплым и сухим периодом среднесуточная температура воздуха составляла в среднем +20 °С, 0 мм осадков, относительная влажность воздуха 42,1 %. Наблюдаемая динамика концентрации пыльцы злаков в период их пиковой активности демонстрирует выраженную зависимость от циклической смены метеорологических условий. Кратковременные периоды осадков, приводящие к эффективному влажному осаждению пыльцевых зерен, вызывали резкое снижение их содержания в приземном слое атмосферы. Однако последующее установление сухой, теплой и ветреной погоды инициировало новый цикл интенсивной эмиссии. Повышенные температуры и инсоляция стимулировали цветение и раскрытие пыльников, а умеренный ветер обеспечивал активный горизонтальный перенос и дисперсию пыльцы. Так, после эпизода осадков 4 июня (5,9 мм), уже к 14 июня (+25, °С, ветер до 5,25 м/с) сформировался очередной пик пыльцевой нагрузки. Таким образом, чередование фаз атмосферного очищения и условий, благоприятствующих выбросу и переносу, в целом определяло выраженную неравномерность внутрисезонной динамики аэропаллинологического спектра.

В третью волну пыления (середина июля – конец августа) количество аллергенной пыльцы составляет в среднем не более 15 % от общегодовой суммы. Доминирующие таксоны *Poaceae*, *Chenopodiaceae*, *Artemisia sp.*, также в спектре представлены *Rumex sp.*, *Urtica sp.*, *Plantago sp.* Данный период характеризуется продолжительным одновременным присутствием в воздухе пыльцы нескольких аллергенных травянистых растений.

Пыление злаков, максимальная концентрация которых была зафиксирована во второй волне, продолжило вносить существенный вклад в общий аэропаллинологический спектр в течение последующей третьей волны.

Для маревых (*Chenopodiaceae*) продолжительность пыления регистрировалась с 20 июня по 28 июля. Максимальная концентрация отмечена 27 июня (100 п.з./м³). Общая годовая концентрация (1040 п.з./м³) составила 3,2 % от общего спектра.

Artemisia sp. период пыления с 24 июля по 22 августа. Максимум пришелся на 8 августа (55 п.з./м³). Годовая концентрация (473 п.з./м³) составила 1,5 %. *Urtica* sp. период пыления с 1 июля по 26 августа. Пиковая концентрация 31 п.з./м³ 14 июля. Суммарный показатель (678 п.з./м³) равен 2,1 % от годового спектра. *Rumex* sp. пыление наблюдалось с 14 июня по 29 июля. Максимальная концентрация 53 п.з./м³ 22 июня. Общая концентрация (522 п.з./м³) составила 1,6 %. *Plantago* sp. пыление продолжалось с 11 июня по 4 августа. Максимум зафиксирован 13 июля – 26 п.з./м³. Вклад в годовой спектр 259 п.з./м³ – 0,8 %.

Динамика пыльцы в период третьей волны характеризовалась выраженной обратной корреляцией с количеством осадков, что особенно четко проявлялось у позднецветущих видов, таких как полынь. Максимальные концентрации аэропалеонтологического спектра регистрировались в фазы с установлением сухой и теплой погоды, создающей условия для интенсивной эмиссии и последующего переноса пыльцевых зерен. Обратный эффект оказывали периоды обильных осадков, которые приводили к практически полному очищению приземного слоя атмосферы за счет механизма влажного осаждения. Так, выпадение 10 и 11 августа 14 и 20,5 мм осадков соответственно обусловило резкий спад концентраций для всех таксонов. В целом повышенная влажность воздуха в этот сезонный период способствовала ускоренному осаждению пыльцы. Однако в интервалах между осадками установление ветреной погоды с низкой относительной влажностью воздуха провоцировало повторный подъем и дисперсию пыльцы, причем данная динамика была наиболее выражена для представителей семейств *Chenopodiaceae* и *Artemisia* sp., чьи пыльцевые зерна обладают соответствующими аэродинамическими свойствами.

Выводы

На основании анализа аэропалеонтологических данных 2025 г. в Барнауле выделяются три последовательные волны пыления, характеризующиеся не только сменой доминирующих таксонов, но и их взаимодействием. Первая волна пыления, приходящая-

ся на весенний период, фаза сезона «предлетье», характеризующаяся устойчивым переходом среднесуточной температуры через +5 °С, формируется преимущественно за счет высокопродуктивных древесных анемофилов, в первую очередь представителей семейства *Betulaceae*. Вторая волна, имеет смешанный состав, где к завершающей фазе пыления отдельных древесных пород добавляется интенсивная эмиссия пыльцы злаков. Третья волна пыления, почти полностью определяется травянистыми таксонами. Важной особенностью сезонной динамики является частичное временное перекрытие (наложение) волн. Это создает периоды, когда в атмосфере города одновременно присутствуют пыльцевые зерна таксонов, типичных для разных сезонных фаз. Наиболее значимым с клинической точки зрения является наложение заключительной стадии первой волны на начальную стадию второй волны (ранее пыление злаков). В эти интервалы спектр атмосферных аллергенов становится комбинированным, что потенциально увеличивает нагрузку для лиц, страдающих поллинозом. Также стоит отметить, что пыльца высокоаллергенных древесных пород, прежде всего березы, регистрируется в атмосфере в фоновых концентрациях и после прохождения основного периода пыления, в том числе в период активного пыления злаков. Это указывает на пролонгированный характер присутствия в воздухе отдельных видов пыльцы, что может быть связано как с вторичным подъемом пыльцевых зерен с поверхности почвы и растительности, так и с растянутым периодом пыления отдельных представителей таксона в пределах урбанизированной территории.

Список литературы

1. Павлюченко И. И., Клименко Я. В., Федотова Н. В., Коков Е. А., Кокова Л. Н., Сторожук А. П., Цымбалов О. В. Аэропалеонтологический мониторинг состояния окружающей среды в отдельно взятом регионе как фактор профилактики поллиноза // Инновационная медицина Кубани. 2023. № 3. С. 62–70. DOI: 10.35401/2541-9897-2023-26-3-62-70. EDN: TDZNDY.
2. Клименко Я. В., Мороз А. Н., Павлюченко И. И. Актуальность аэропалеонтологического мониторинга воздушной среды г. Краснодара // Здоровье нации в XXI веке: материалы II Всероссийской научно-практической конференции (г. Краснодар, 23 сентября 2021 г.). Краснодар: ФГБУ «Российское энергетическое агентство» Минэнерго России Краснодарский ЦНТИ – филиал ФГБУ РЭА Минэнерго России, 2021. С. 53–59. EDN: UMKLVJ.
3. Кудрявцева А. В., Ксензова Л. Д., Фарбер И. М., Хачатрян Л. Г. Весенний поллиноз в период с 2001 по 2021 г. в Московском регионе // Основы терапии. Вопросы практической педиатрии 2021. № 16 (6). С. 127–133. DOI: 10.20953/1817-7646-2021-6-127-133.

4. Мигачева Н. Б. Пыльцевая аллергия и пыльцевая сенсибилизация: новый взгляд на старую проблему // Аллергология и иммунология в педиатрии. 2022. № 1 (68). С. 4–15. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/pyltsevaya-allergiya-i-pyltsevaya-sensibilizatsiya-novyuy-vzglyad-na-staruyu-problemu> (дата обращения: 26.03.2026). DOI: 10.53529/2500-1175-2022-1-4-15.
5. Посевина Ю. М., Северова Е. Э. Динамика пыльцевого дождя в Рязани: первые волнометрические данные // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел биологический. 2017. Т. 122. № 4. С. 102–108. EDN: ZIFUOH.
6. Карасева В. С., Селезнева Ю. М., Северова Е. Э. Мониторинг пыления злаков в городе Рязани // Ботанический журнал. 2025. Т. 110. № 2 С. 175–187. URL: https://botjournal.ru/s26586339s0006813625020053-1/?version_id=106246 (дата обращения: 13.03.2026). DOI: 10.31857/S0006813625020053. EDN: DNACQM.
7. Ненашева Г. И. Растительность и климат голоцена межгорных котловин Центрального Алтая: монография. Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2013. 164 с. URL: <http://www.asu.ru/files/documents/00015088.pdf> (дата обращения: 26.03.2026). ISBN 978-5-7904-1454-1.
8. Куприянова Л. А., Алешина Л. А. Пыльца и споры растений флоры европейской части СССР. Л.: Наука, 1972. Т. 1. 171 с. URL: https://rusneb.ru/catalog/010003_00061_941bf7ad40b161c9c1fe983349bcbfba/ (дата обращения: 06.02.2026).
9. Ненашева Г. И., Козырева Ю. В., Слажнева С. С., Харламова Н. Ф., Минакова А. Е. Аэропалинологический мониторинг в г. Барнауле (Алтайский край, Россия) с учетом влияния метеорологических факторов на пыление растений в лесостепной зоне Сибири // Региональная экономика и управление. 2024. № 4 (80). Номер статьи: 8009. URL: <https://eee-region.ru/article/8009/> (дата обращения: 06.02.2026).
10. Харламова Н. Ф. Климат и сезонная ритмика природы Барнаула: монография. Барнаул: Изд-во АлтГУ, 2013. 132 с. URL: <http://elibrary.asu.ru/handle/asu/153> (дата обращения: 06.02.2026).
11. Максимова Н. Б., Морковкин Г. Г., Ненашева Г. И. Динамика сроков наступления вегетационного периода по природно-почвенным зонам Алтайского края за 1955–2020 годы // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2023. № 4 (220). С. 110–117. DOI: 10.18522/1026-2237-2023-4-110-117. EDN: AHISQK.
12. Стребкова А. С., Карманова М. В., Ненашева Г. И. Характеристика фаз весенне-летнего сезона года на примере территории Алтайского края // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2025. № 4. С. 103–111. DOI: 10.18522/1026-2237-2025-4-103-111.
13. Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных. URL: <https://www.meteorf.gov.ru/special/about/structure/piu/354/> (дата обращения: 26.02.2026).
14. Чурюкина Э. В., Уханова О. П., Голошубова Е. А. Аэропалинологический мониторинг воздушной среды в Ростовской области: результаты сезона палинации 2019 года // Российский аллергологический журнал. 2020. Т. 17. № 4. С. 57–65. DOI: 10.36691/RJA1387.
15. Елькина Н. А. Календарь пыления аллергенных растений г. Петрозаводска // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2018. № 8 (177). С. 78–82. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kalendar-pyleniya-allergen-nyh-rasteniy-g-petrozavodska> (дата обращения: 04.02.2026). DOI: 10.15393/uchz.art.2018.255.

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 гранта РФФ № 24-27-20087 «Аллергокомфортность природной среды и привлекательность рекреационных территорий юга Западной Сибири как основа развития лечебно-оздоровительного туризма».

Financing: The work was carried out as part of the Russian Foundation for Basic Research grant No. 24-27-20087 “Allergocomfortability of the Natural Environment and Attractiveness of Recreational Areas in the South of Western Siberia as a Basis for the Development of Medical and Health Tourism”.

СТАТЬИ

УДК 551.736:519.246
DOI 10.17513/use.38500



CC BY 4.0

**К ВОПРОСУ ОБ ИССЛЕДОВАНИИ СТРОЕНИЯ
ОСАДОЧНОГО РАЗРЕЗА МЕТОДОМ ЦЕПЕЙ МАРКОВА
НА ПРИМЕРЕ НИЖНЕКАЗАНСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ
ЮГО-ВОСТОКА РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН**

Нургалиева Н. Г., Фахрутдинов Э. И. ORCID ID 0000-0001-7667-0631

*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Казанский (Приволжский) федеральный университет», Казань, Российская Федерация,
e-mail: MKS-1989eduard@yandex.ru*

Цель исследования заключается в изучении математических закономерностей строения пермских отложений с применением метода цепей Маркова на примере нижнеказанских отложений юго-востока Русской плиты. Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки новых подходов к анализу геологических разрезов, позволяющих более глубоко понимать процессы формирования осадочных толщ. Объектом исследования являются нижнеказанские отложения междуречья рек Лесная Шешма и Инэш, представленные терригенно-карбонатным разрезом общей толщиной более 60 метров. Методы исследования включают математическое моделирование с использованием цепей Маркова, петрофизические исследования состава пород, статистический анализ данных. Проведен анализ матрицы вероятностей переходов между типами пород по выборке из 150 наблюдений. Выявлены интервалы стабильного осадконакопления и резких изменений в чередовании пород. Установлено циклическое строение разреза с выделением пяти полных осадочных циклов. По числу циклов камышлинский горизонт характеризуется наибольшей полнотой разреза по сравнению с соседними горизонтами. Практическая значимость работы заключается в развитии цифровых подходов к анализу пермских отложений, позволяющих более точно интерпретировать строение и особенности их формирования и расширяющих понимание палеогеографических условий.

Ключевые слова: пермские отложения, нижнеказанские отложения, метод цепей Маркова, терригенно-карбонатные разрезы, осадочные циклы

**ON THE STUDY OF THE SEDIMENTARY SECTION STRUCTURE
USING THE MARKOV CHAINS METHOD: A CASE STUDY
OF THE LOWER KAZANIAN DEPOSITS IN THE SOUTHEAST
OF THE REPUBLIC OF TATARSTAN**

Nourgalieva N. G., Fakhrutdinov E. I. ORCID ID 0000-0001-7667-0631

*Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education
«Kazan (Volga Region) Federal University», Kazan, Russian Federation,
e-mail: MKS-1989eduard@yandex.ru*

The purpose of the study is to investigate the mathematical patterns of Permian deposits structure using the Markov chains method on the example of Lower Kazanian deposits in the southeast of the Russian Plate. The research is focused on developing a new approach to understanding the mathematical patterns of sedimentary strata formation and their cyclic structure. The object of research is the Lower Kazanian deposits of the interfluvium of the Lesnaya Sheshma and Inesh rivers, represented by a terrigenous-carbonate section with a total thickness of about sixty meters. The research methods include mathematical modelling using Markov chains, petrophysical studies of rock composition, and statistical data analysis. The analysis of one hundred fifty levels throughout the entire section was conducted. Intervals of stable sedimentation and abrupt changes in rock succession were identified. A cyclic structure of the section was established, with the identification of five complete sedimentary cycles. In terms of the number of cycles, the Kamyshlinsky Horizon is characterized by the highest section completeness compared to adjacent horizons. The practical significance of the work lies in advancing a digital approach to the analysis of the Permian sedimentary successions, enabling more accurate interpretation of their structure and formation features, and broaden the understanding of paleogeographic conditions.

Keywords: Permian system, Lower Kazanian succession, Markov chain method, terrigenous-carbonate sections, sedimentary cycles

Введение

Пермские отложения, распространенные на востоке Русской плиты, известны своим пестрым составом и сложным строением, обусловленным изменчивостью обстановок осадконакопления на протяжении истории формирования этой уникальной

осадочной толщи. Не исключением являются и входящие в состав пермской системы нижнеказанские отложения в Республике Татарстан (РТ), образовавшиеся во время движения так называемого Казанского палеоомора. На обширной территории существовал спектр обстановок осадконакопления,

связанный с этим палеоморем, в котором доминировали морские мелководные и лагунные обстановки. Сложная циклическая история осадконакопления в казанский век, и в частности в раннеказанское время, привела к сложному строению осадочных разрезов, характеризующихся специфическим чередованием пачек и слоев, составляющих терригенно-карбонатные разрезы. Изучение закономерностей строения таких разрезов всегда выступает актуальной задачей со времени открытия пермской системы Р. И. Мурчисоном (1841) и изучения седиментационных пермских циклов Н. А. Головкинским [1; 2]. Одним из направлений в изучении осадочных систем, в том числе пермских, является математическое и статистическое описание и моделирование строения осадочных разрезов. В этом плане в отношении казанских отложений востока Русской плиты важно отметить труды Ю. В. Сементовского, предложившего литомодули и работы Н. Г. Нурғалиевой, Э. В. Утемова, В. Е. Косарева, Д. К. Нурғалиева и др. [1] по выявлению фрактальной природы и циклического строения стратиграфической записи перми.

Цель настоящего исследования состоит в развитии представлений о математических закономерностях строения пермских отложений на основе применения метода цепей Маркова.

Материалы и методы исследования

Цепи Маркова – это математические модели, описывающие процессы, в которых вероятность перехода в следующее состояние зависит только от текущего состояния [3]. В геологии такие процессы, например, подробно рассмотрены в [4-6].

В современной геологии цепи Маркова активно используются для моделирования разрезов скважин и оценки вероятности переходов между различными фациями [7-9].

Марковский процесс характеризуется тем, что нахождение системы в определённом состоянии в данный момент времени можно определить по информации о предшествующих состояниях. Для описания поведения марковских цепей строятся матрицы вероятностей перехода [10-12].

В настоящей работе применяется код, составленный на Python, выполняющий подготовку данных, подсчет переходов между состояниями (типами горных пород (песчаник, алевролит, глина, мергель, известняк, доломит)), построение матрицы переходов, проверку последовательности на наличие

марковского свойства, анализ полученной матрицы.

Оценка достоверности матрицы переходов проводилась путем использования теста отношения правдоподобия, теста χ^2 , критерия АИС (критерия Акаике) согласно [9].

Объектом исследований выбраны нижнеказанские отложения, опробованные в междуречье р. Лесная Шешма и р. Инэш на юго-востоке Русской плиты. Разрез представлен отложениями байтуганского, камышлинского и красноярского горизонтов общей толщиной ~61 м [13]. По составу это терригенно-карбонатный разрез, в котором отмечается сложное переслаивание смешанных разностей алевролитов, глин, мергелей и карбонатных пород.

Непосредственным материалом для исследований послужила совокупность данных по типам горных пород, установленным на основе классификации [14, с. 34–35]. В работе [14] описана методика классификации и номенклатуры карбонатных и смешанных пород. Предлагается упрощенный подход к определению состава пород. Вместо трудоемкого нормативного пересчета рекомендуется вычислять отношение содержаний MgO/CaO по данным фазового «карбонатного» анализа, что позволяет точно определить процент доломита в карбонатном веществе. Используются градации С. Г. Вишнякова (0–5–25–50–75–95–100%), а также методики определения содержания силикатного компонента в смешанных породах. Особое внимание уделяется проблеме терминологии при наименовании смешанных пород, в частности мергелей. Предлагается расширенное традиционное понимание термина «мергель», включая в него не только глинисто-карбонатные, но и другие разновидности смешанных пород. Методика включает использование классификационного треугольника Вишнякова для графического определения состава пород и позволяет корректно именовать различные типы карбонатных и смешанных пород, включая конкреоиды. В указанной классификации выделено 30 классов осадочных пород по соотношению содержания кальцита, доломита и нерастворимого остатка [14, с. 34-35]. Эти классы соотнесены с группами доломитов, известняков, мергелей и терригенных разностей (глин, алевролитов, песчаников). Эти группы использованы как состояния для анализа методом марковских цепей.

Измерение содержаний кальцита, доломита и нерастворимого остатка в породах

проводилось с помощью кадометра в петрофизической лаборатории КФУ согласно [15]. Методика исследования горных пород с помощью прибора «Кадометр» основана на количественном измерении содержания карбонатных минералов (кальцита и доломита) путем фиксации объема углекислого газа, выделяющегося при реакции образца с 12%-ной соляной кислотой, при этом принцип работы базируется на прямой зависимости между массой карбонатов и объемом CO_2 , а также на различной скорости реагирования кальцита и доломита с реагентом, что позволяет их дифференцировать. Техническая реализация осуществляется с помощью автоматизированного комплекса, включающего реакционную камеру с системой дозирования кислоты, высокоточные весы для измерения массы вытесненной жидкости, специализированное программное обеспечение для обработки данных и систему контроля параметров эксперимента. Процесс анализа состоит из этапов подготовки пробы (измельчение до размера 0.07-0.02 мм и взвешивание навески 0.5-5 г), проведения самого анализа (добавление дистиллированной воды, дозирование кислоты и регистрация выделяющегося газа) и последующей компьютерной обработки результатов, методика характеризуется высокой точностью измерений (погрешность $\pm 5\%$), широким диапазоном определяемых содержаний (0–100%), возможностью работы с малыми пробами и раздельным определением обоих типов карбонатов, однако требует строгого соблюдения условий подготовки проб, использования качественных реактивов, регулярного технического обслуживания и калибровки оборудования, а также соблюдения рабочих параметров (температура $+20\dots+30\text{ }^\circ\text{C}$, влажность до 90%, атмосферное давление 98-108 кПа).

Результаты исследований и их обсуждение

Данные, полученные по соотношению карбонатности (содержание карбонатных минералов – кальцита, доломита) и нерастворимого остатка, были использованы для выявления типов горных пород по 150 уровням по всему разрезу нижнеказанских отложений [13] согласно [14, с. 34-35].

Установлено наличие пород, принадлежащих большей части классов согласно [14, с. 34-35]. Эти классы были объединены с учетом карбонатности и размера зерен

обломочной части (нерастворимого остатка) в состоянии: 1 – песчаник, 2 – алевролит, 3 – глина (классы 25-29 по [14, с. 34-35]), 4 – мергель (классы 13-24 по [14, с. 34-35]), 5 – известняк (классы 8, 9 по [14, с. 34-35]), 6 – доломит (классы 4, 10-12 по [14, с. 34-35]).

Главным результатом применения программного кода по анализу методом цепей Маркова к выборке из 150 наблюдений явилась матрица вероятностей переходов между (состояниями) в виде цветовой карты (рис. 1).

Матрица переходов представляет собой квадратную матрицу, где строки соответствуют текущему состоянию (типу породы); столбцы – следующему состоянию (типу породы). Элементами матрицы являются вероятности перехода от одного типа породы к другому.

В нашем случае используется шесть состояний (типов пород), поэтому матрица имеет размер 6×6 .

Оценка достоверности полученной матрицы согласно [9] показала, что статистика отношения правдоподобия имеет значение – 417.96, меньшее, чем критическое значение 179.58; значение АИС составляет 88.43, а значение $\chi^2 = 3.55$ меньше критического значения 37.65. Следовательно, полученная матрица переходов по указанным критериям характеризуется марковским свойством и достоверна.

Согласно матрице переходов (рис. 1) песчаник (состояние 1) с вероятностью 0.29 переходит в мергель (4) или доломит (6).

Алевролит (2) характеризуется высокой вероятностью остаться алевролитом (0.46); часто переходит в глину (3) и мергель (4).

Глина (3) остается глиной с вероятностью 0.41; часто переходит в мергель (4) (вероятность 0.37).

Мергель (4) переходит в мергель с вероятностью 0.48; также переходит в известняк (5, вероятность 0.16) и доломит (6, вероятность 0.12).

Известняк (5) переходит в известняк или в мергель с вероятностью 0.25.

Доломит (6) переходит в мергель с вероятностью 0.5 и в доломит с вероятностью 0.39.

Чередование пород (состояний) указывает на периодические изменения условий осадконакопления (глубина моря, удаленность от источника сноса, климат и т. д.).

Высокие вероятности оставаться в том же типе породы (особенно для мергеля, алевролита и доломита) указывают на длительные периоды стабильных условий.

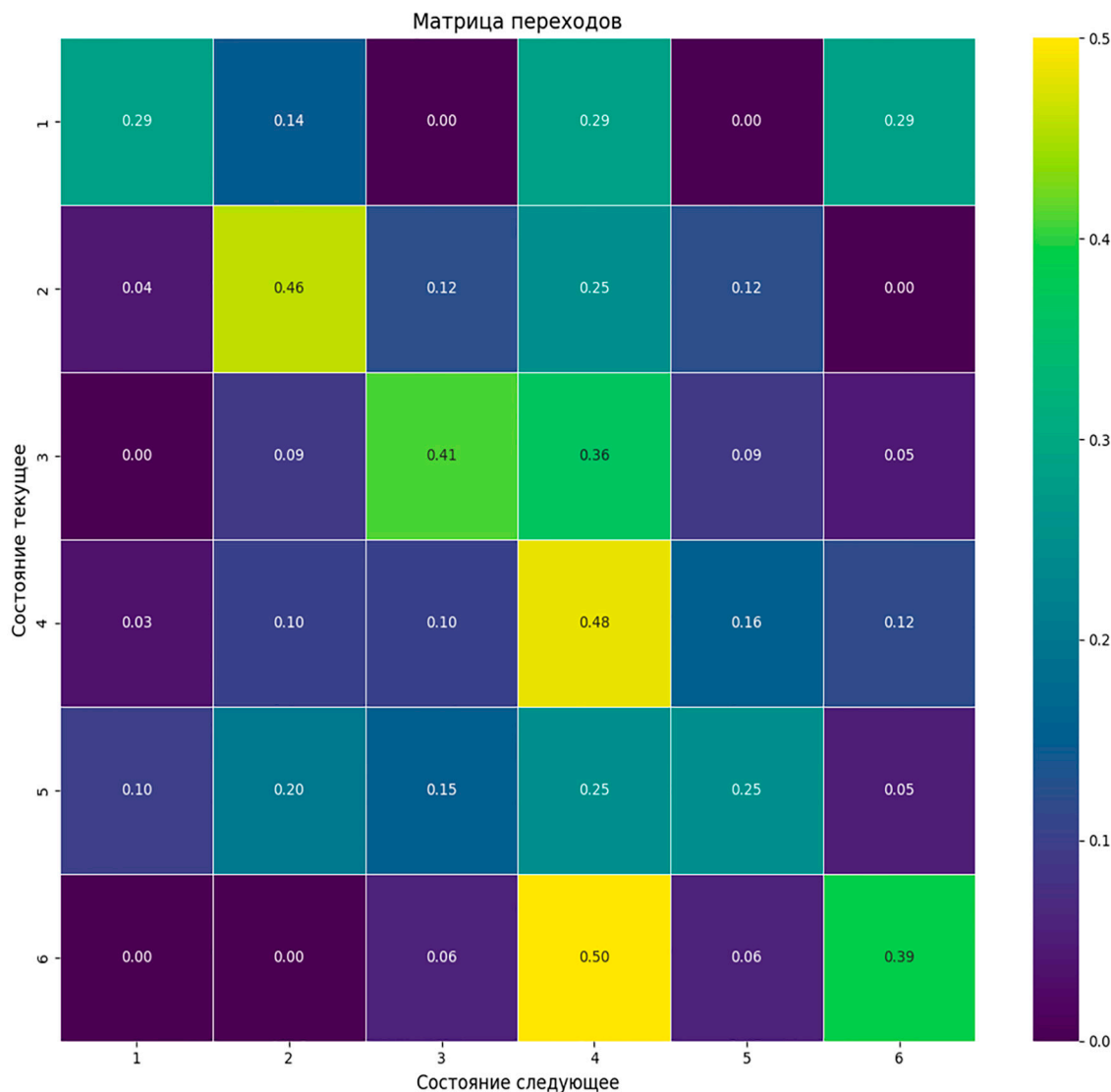


Рис. 1. Цветовая карта матрицы переходов. Каждая ячейка матрицы показывает вероятность перехода из состояния, указанного по вертикальной оси, в состояние, указанное по горизонтальной оси. Состояния: 1 – песчаник, 2 – алевролит, 3 – глина, 4 – мергель, 5 – известняк, 6 – доломит. Значения в ячейках представлены в виде чисел (вероятность перехода)/цветов (интенсивность перехода)

Источник: составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследования

Переходы между разными типами пород (например, песчаник → мергель или глина → мергель) свидетельствуют о существенных изменениях среды осадконакопления.

Высокая вероятность переходов между мергелем, известняком и доломитом говорит о значительном вкладе карбонатного осадконакопления в разрезе.

Переходы к песчанику и алевролиту указывают на эпизоды усиления сноса обломочного материала с суши.

К интервалам стабильных условий осадконакопления (диагональные элементы

матрицы >0,4 (рис. 1)) относятся, например, интервалы 29.09–33.39 м (серия мергелей с редкими прослоями других пород); 28.15–28.39 м (серия доломитов); 17.03–18.55 м (чередование мергеля и известняка, с преобладанием мергеля); 7.35–7.44 м (серия доломитов) (рис. 2).

Указанные интервалы могут быть охарактеризованы как длительные периоды стабильного морского режима с преимущественно карбонатным осадконакоплением (мергель, доломит) или терригенным осадконакоплением (алевролит).

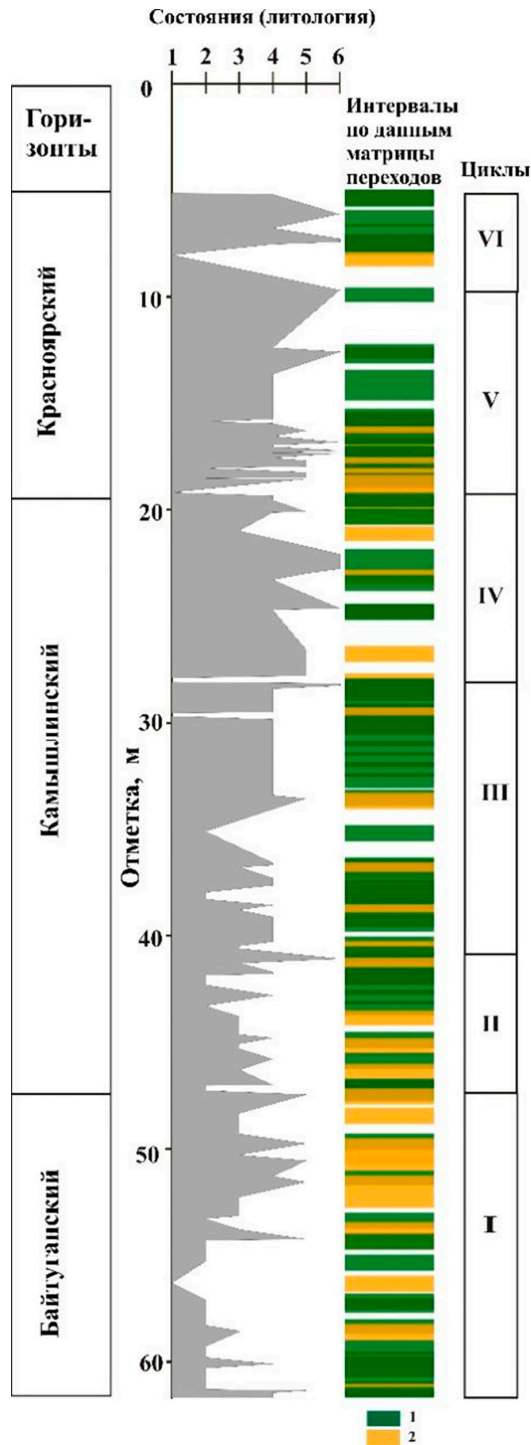


Рис. 2. Строение разреза нижнеказанских отложений. Состояния (литология): 1 – песчаник, 2 – алевролит, 3 – глина, 4 – мергель, 5 – известняк, 6 – доломит. Условные обозначения: 1 – интервалы стабильных условий осадконакопления (диагональные элементы матрицы $>0,4$ (рис. 1)); 2 – интервалы резких изменений в условиях осадконакопления (элементы матрицы вне диагонали с высокими значениями (рис. 1)). Источник: составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследования

Интервалы резких изменений условий осадконакопления характеризуются частыми переходами между разными типами пород (высокие значения вне диагонали матрицы (рис. 1)), например: переход на отметке 8,05 м (песчаник (1) → мергель (4) ($P(1 \rightarrow 4) = 0.29$)); переход на отметке 28,49 м (мергель (4) → песчаник (1), затем снова мергель); переход на отметке 20,99 м (глина (3) → мергель (4) ($P(3 \rightarrow 4) = 0.36$)); серия переходов на глубинах 40,29–41,85 м (чередование глины, мергеля, алевролита); переходы на отметках 16,55 м, 17,33 м, 35,09 м (известняк → мергель ($P(5 \rightarrow 4) = 0.25$)), рис. 2).

Интервалы усиления сноса терригенного материала сопоставляются с эпизодами регрессии (обмеления), когда береговая линия приближается к области осадконакопления (тектонические поднятия суши, активизация эрозии; климатические изменения (увеличение атмосферных осадков, усиление стока); формирование дельтовых или прибрежно-морских фаций). Интервалы усиления сноса обломочного материала с суши характеризуются переходами к песчанику (1) и алевролиту (2), например: появление песчаника (1) (отметка 8,05 м); отметки 29,54 м и 29,69 м (мергель (4) → песчаник (1)); появление алевролита (2) (отметка 15,85 м: мергель (4) → алевролит (2)); отметки 42,79 м, 43,29 м (мергель (4) → алевролит (2)); отметки 47,03 м – 47,29 м (серия алевролитов).

Распределение состояний и переходов задает циклический рисунок строения разреза: выделяются регрессивно-трансгрессивные циклы (пять полных и один неполный) категории D по классификации Миалла [1; 2]. Их границы контролируются характерной сменой литотипов и зон условий осадконакопления по данным матрицы переходов: регрессивная фаза отмечается переходами, связанными с усилением влияния суши (глина/карбонат → алевролит → песчаник), а трансгрессивная фаза характеризуется переходами, связанными с увеличением доли тонкозернистого материала и карбонатов (песчаник → алевролит → глина/карбонат). Один цикл приходится на байтуганское время, три цикла – на камышлинское время и один полный+один неполный циклы – на красноярское время.

Таким образом, камышлинский горизонт характеризуется наибольшей полнотой и литофациальным разнообразием циклической летописи по сравнению с байтуганским и красноярским горизонтами, что согласуется с данными [13].

Проведенный анализ строения нижнеказанских отложений методом цепей Маркова показал информативность матрицы переходов для понимания закономерностей формирования разреза, его неоднородности и цикличности.

Заключение

Проведенное исследование демонстрирует перспективность применения метода цепей Маркова для анализа строения нижнеказанских отложений на основе распределения событий осадконакопления, распознаваемых в матрице переходов. Подобный подход может быть использован для изучения других подразделений пермской системы, строение которой характеризуется сложным фаціальным строением, обусловленным колебаниями уровня моря.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на сочетание метода цепей Маркова с традиционными методами геологического анализа и на совершенствование алгоритмов сбора и обработки данных и построения матриц переходов с высоким уровнем достоверности.

Полученные результаты могут служить предварительной основой для создания новых методических рекомендаций по изучению осадочных разрезов, что имеет важное значение для развития циклического анализа в связи с тем, что математическая модель, построенная на основе марковских процессов, позволяет оценивать вероятность сценариев формирования осадочных толщ.

Список литературы

1. Нурғалиева Н. Пермские осадочные разрезы востока Русской плиты. Цикличность и фрактальные образы. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2010. 210 с. ISBN: 9783843301008.
2. Фахрутдинов Э. И., Нурғалиева Н. Г. Литолого-фаціальные особенности пачки лингуловых глин на юго-востоке Республики Татарстан по данным гранулометрического состава и карбонатности // Успехи современного естествознания. 2025. № 8. С. 42-55. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=38420> (дата обращения: 13.09.2025). DOI: 10.17513/use.38420.

3. Вистелиус А. Б. Основы математической геологии. Ленинград: Недра, 1980. 389 с. URL: <https://lithology.ru/system/files/books/vistelius.pdf> (дата обращения: 13.02.2026).

4. Wang Z. Z., Huang X., Liang Y. R. Oil-gas reservoir lithofacies stochastic Modeling based on one-to three-dimensional Markov chains // J. Cent. South Univ. 2018. Vol. 25 (6). P. 1399–1408. DOI: 10.1007/s11771-018-3835-3.

5. Cao W., Zhou A., Shen S. L. An analytical method for estimating horizontal Transition probability matrix of coupled Markov chain for simulating geological uncertainty // Comput. Geotech. 2021. Vol. 129. P. 103871. DOI: 10.1016/j.compgeo.2020.103871.

6. Yang H. Q., Chu J., Qi X., Wu S., Chiam K. Stochastic simulation of geological cross-sections from boreholes: a random field approach with Markov Chain Monte Carlo method // Eng. Geol. 2023. Vol. 327. P. 107356. DOI: 10.1016/j.enggeo.2023.107356.

7. Wang F., Li H., Li G., You Z. J., Chen E. J. Characterization of geological Uncertainties from limited boreholes using copula-based coupled Markov chains for underground construction // Undergr. Space. 2024. Vol. 16. P. 94–105. DOI: 10.1016/j.undsp.2023.09.009.

8. Zhang J. Z., Liu Z. Q., Zhang D. M., Huang H. W., Phoon K. K., Xue Y. D. Improved coupled Markov chain method for simulating geological uncertainty // Eng. Geol. 2022. Vol. 298. P. 106539. DOI: 10.1016/j.enggeo.2022.106539.

9. Jiang Q.-H., Zhang J.-Z., Zhang D.-M., Huang H.-W. Simulation of geological uncertainty based on improved three-dimensional coupled Markov chain model // Engineering Geology. 2024. Vol. 340. P. 107647. DOI: 10.1016/j.enggeo.2024.107647.

10. Qi X. H., Li D. Q., Phoon K. K., Cao Z. J., Tang X. S. Simulation of geologic uncertainty using coupled Markov chain // Eng. Geol. 2016. Vol. 207. P. 129–140. DOI: 10.1016/j.enggeo.2016.04.017.

11. Deng Z. P., Pan M., Niu J. T., Jiang S. H. Full probability design of soils lope considering both stratigraphic uncertainty and spatial variability of soil properties // B. Eng. Geol. Environ. 2022. Vol. 81 (5). P. 1–13. DOI: 10.1007/s10064-022-02702-2.

12. Gong W. P., Tang H. M., Wang H., Wang X. R., Juang C. H. Probabilistic analysis and design of stabilizing piles in slope considering stratigraphic uncertainty // Eng. Geol. 2019. Vol. 259. P. 105–162. DOI: 10.1016/j.enggeo.2019.105162.

13. Nurgalievа N. G., Silantiev V. V., Fakhрутдинов E. I., Gareev B. I., Batalin G. A. The Lower Kazanian rocks as shallow marine facies (south-eastern Tatarstan) on geochemistry data // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2016. Vol. 11. № 23. P. 13462–13471. URL: http://www.arpnjournals.org/jeas/research_papers/rp_2016/jeas_1216_5413.pdf (дата обращения: 26.02.2026).

14. Юдович Я. А., Кетрис М. П. Как назвать карбонатсодержащую породу? (Из опыта практической работы) // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. 2016. № 3. С. 33-36. DOI: 10.19110/2221-1381-2016-3-33-36.

15. Прибор для определения карбонатности горных пород «Кадометр»: Паспорт. Руководство по эксплуатации. ООО «ЭкогеосПром». Тверь, 2022. 17 с. ТУ–ЛЕАН. 032.99103030.2013.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.



ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ РТУТИ В ПРОДУКТАХ РЫБОЛОВСТВА НА КАЧЕСТВО И БЕЗОПАСНОСТЬ РЫБНОЙ ПРОДУКЦИИ (НА ПРИМЕРЕ ПРИРОДНЫХ ВОДОЕМОВ АЛТАЯ)

¹Осипова Н. А. ORCID ID 0000-0003-2340-8167,

¹Шорохова М. Г., ²Шкригун А. А., ³Торопов А. В.

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский государственный университет», Томск,
Российская Федерация, e-mail: osipova-nina@yandex.ru;

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Томск,
Российская Федерация;

³Ассоциация патриотического воспитания «Хозяин Своей Земли», Бийск, Российская Федерация

Проблема, обсуждаемая в статье, связана с тем, что ртуть обладает способностью накапливаться в биологических тканях в опасной для здоровья метилированной форме. При регулярном употреблении рыбы, содержащей ртуть, могут возникнуть неблагоприятные последствия для здоровья. Целью исследования является определение содержания ртути в органах рыб в водоемах Алтая, используемых для любительского рыболовства, и оценка риска для человека методом анализа видов и последствий потенциальных отказов. Материал исследования – рыба, выловленная в природных водоемах Алтая. Изучено содержание ртути в органах рыбы, пойманной в водохранилищах Алтайского края, местах активного рыболовства – р. Бия, р. Курья (Усть-Пристанский район), Старообский канал (Шеболинский район). Определение содержания ртути в отобранных пробах проводилось атомно-абсорбционным методом (ртутный анализатор РА-915+ с приставкой ПИРО-915). Установлено, что содержание ртути в мышечной ткани рыб не превышает допустимой остаточной концентрации. По уменьшению содержания ртути органы рыб (щука, окунь) располагаются в следующем ряду: мышцы > кишечник > кости > жабры > молоки > икра. Ориентировочно оценены уровни безопасного потребления рыбы при содержании в ней ртути на уровне установленных значений. Проведена оценка рисков для человека при заражении рыбы ртутью методом анализа видов и последствий потенциальных отказов. Интеграция этого анализа с натурными исследованиями и оценкой риска на основе референтных доз может быть использована при контроле качества продуктов рыболовства.

Ключевые слова: безопасность пищевых продуктов, ртуть в ихтиофауне, оценка рисков, метод анализа видов и последствий отказов, ихтиоиндикация водоемов

THE IMPACT OF MERCURY CONTENT IN FISHING PRODUCTS ON THE QUALITY AND SAFETY OF FISH PRODUCTS (ON THE EXAMPLE OF NATURAL WATERBODIES IN ALTAI)

¹Osipova N. A. ORCID ID 0000-0003-2340-8167,

¹Shorokhova M. G., ²Shkrigun A. A., ³Toropov A. V.

¹Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education
“National Research Tomsk State University”, Tomsk, Russian Federation,
e-mail: osipova-nina@yandex.ru;

²Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education
“National Research Tomsk Polytechnic University”, Tomsk, Russian Federation;

³Association of Patriotic Education “Master of His Land”, Biysk, Russian Federation

The problem discussed in the article is related to the fact that mercury has the ability to accumulate in biological tissues in a methylated form that is dangerous to health. With regular consumption of fish containing mercury, adverse health effects may occur. The aim of the study is to determine the mercury content in fish organs in Altai reservoirs used for recreational fishing, and to assess the risk to humans by analyzing the types and consequences of potential failures. The materials for the study are fish caught in natural reservoirs of Altai. The mercury content in the organs of fish caught in reservoirs of the Altai Territory, places of active fishing – the Biya River, the Kurya River (Ust-Pristsansky district), the Staroobsky Canal (Shebolikhinsky district) has been studied. The mercury content in the organs of the fish was determined by atomic absorption method (Mercury analyzer RA-915+ with the prefix PYRO-915). It was found that the mercury content in the muscle tissue of fish does not exceed the permissible residual concentration. To reduce the mercury content, the organs of fish (pike, perch) are arranged in the following row: muscles > intestines > bones > gills > milks > caviar. The levels of safe consumption of fish with mercury content in it at the level of established values are estimated. An assessment of the risks to humans in case of mercury contamination of fish was carried out by analyzing the types and consequences of potential failures. The integration of this analysis with field studies and risk assessment based on reference doses can be used in quality control of fishery products.

Keywords: food safety, mercury in the ichthyofauna, risk assessment, method of analysis of types and consequences of failures, ichthyoindication of reservoirs

Введение

При оценке качества пищевой продукции содержание в ней тяжелых металлов, в частности ртути, занимает особое место. Известны случаи массовых отравлений рыбой жителей Японии (бухта Минамата) [1]. В последние годы концепция риска приобрела первостепенное значение в международном регулировании пищевых продуктов, в том числе рыбы [2, 3]. Промышленным предприятиям все чаще приходится проводить оценку рисков, связанных с рыбной продукцией. Развитию этой методологии в немалой степени способствуют научные исследования о накоплении ртути в промысловых рыбах [4], выявление взаимосвязи биохимических показателей рыб с концентрацией ртути [5].

Для обеспечения безопасности рыбной продукции среди прочих факторов необходимо устранить такие риски, как биоаккумуляция тяжелых металлов и образование токсинов [6].

Вследствие специфических физико-химических свойств ртуть обладает способностью накапливаться в биологических тканях в опасной для здоровья метилированной форме. При регулярном употреблении рыбы, содержащей ртуть, могут возникнуть неблагоприятные последствия для здоровья. Ртуть вызывает заболевания нервной, репродуктивной, иммунной систем, почек [7]. Геоэкологические и геохимические исследования вносят весомый вклад в оценку безопасности потребления рыбы в пищу [8]. Щука обыкновенная (*Esox lucius* L., 1758) и речной окунь (*Perca fluviatilis*) вследствие биологических особенностей и строения [9, 10] используются как индикаторы экологического состояния водоемов. Повышенное содержание ртути в мышечной ткани рыбы обнаружено во многих водоемах России как в Западной Сибири [11], так и в европейской части страны [12, 13].

Содержание ртути в органах рыб определяется условиями обитания, химическим составом воды, природными и техногенными факторами. Согласно нормам и требованиям ТР/ТС 021/2011 к живой, свежей и замороженной продукции предельно допустимый показатель у нехищных пресноводных видов 0,3 мкг/г, у морских 0,5, у хищных пресноводных 0,6¹. Принятая в России допустимая остаточная концентрация (ДОК)

ртути в мышечной ткани свежих рыбопродуктов (согласно СанПиН 2.3.2.560-96 и ГН 2.1.5.690-98) составляет 0,5 мкг/г сырой массы.

Среди методов оценки рисков метод анализа видов и последствий потенциальных отказов (FMEA) может использоваться для оценки качества рыбы (например, в пищевой промышленности [6, 14, 15]). Метод помогает выявить потенциальные дефекты (отказы), их причины и последствия, оценить риски их появления и обнаружения, а также принять меры для устранения или снижения вероятности и ущерба от их появления.

Так, для оценки рисков при производстве лосося был применен метод FMEA в сочетании с ISO 22000 [6]. Метод был использован для анализа и прогнозирования возможных сбоев в системе пищевой цепочки при переработке лосося на основе функций, характеристик и/или взаимодействий ингредиентов или процессов, от которых зависит система. Было показано, что на стадии ловли рыбы опасность заражения тяжелыми металлами идентифицируется наряду с такими опасностями, как микроорганизмы, пестициды, химические токсины. Приоритетное число риска (ПЧР) для этих конкретных рисков превышает критический предел безопасности. После принятия мер по исправлению ситуации (например, смена места вылова, регулярный контроль и аудит) показатель ПЧР снижается до нормального уровня.

Цель исследования – определение содержания ртути в органах рыб в водоемах Алтая, используемых для любительского рыболовства, и оценка риска для человека методом анализа видов и последствий потенциальных отказов.

Материалы и методы исследования

В ходе работы были отобраны 4 партии проб в водоемах Алтайского края, изучены 10 особей. Пробы отобраны рыбаками Алтайского рыболовного клуба. Именно в этих местах вылавливается много рыбы, которая составляет пищевую корзину жителей близлежащих поселков.

Место отбора партии I (щуки) – р. Бия, на 1 км ниже по течению от края жилой застройки г. Бийска Алтайского края, на 4 км ниже по течению Бийского речного порта.

Партия II (окуни) отобрана в левобережной медленнотекущей протоке р. Бия на 2 км ниже по течению от с. Соусканиха Красногорского района Алтайского края. Протока является местом нереста, нагу-

¹ Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 021/2011. О безопасности пищевой продукции: ИС «Техэксперт: 6 поколение» Интранет. 2011. 36 с. [Электронный ресурс]. URL: https://sh5-svetlograd-r07.gosweb.gosuslugi.ru/netcat_files/50/2891/TR_TS_021.pdf (дата обращения: 13.03.2026).

ла и зимовки щуки, окуня, плотвы, уклеи, ельца, постоянным местом обитания карася. Промпредприятия отсутствуют, развито сельское хозяйство, в том числе посевы зерновых, заготовка сена, выпас скота.

Окуни партии III выловлены в р. Курья, в пределах с. Клепиково Усть-Пристанского района Алтайского края, на территории заказника с разрешенным любительским рыболовством и запретом на использование моторных лодок. Курья – медленнотекущая река правобережной поймы р. Оби, место нереста, нагула и зимовки щуки, окуня, плотвы, постоянное место обитания карася и линя. Антропогенная нагрузка минимальная и связана с любительским рыболовством.

Партия IV (окуни) отбиралась в протоке Старая Обь в устье курьи Заломная (акватория Алтайского края), которая течет в западном направлении по заболоченной пойме Оби. Впадает в Обь по левому берегу в 3192 км от ее устья на высоте 115,5 м над уровнем моря.

Каждую особь очищали от чешуи. Далее извлекали органы, отделяли костную и мышечную ткань и высушивали их до постоянной массы. Образцы измельчали и приступали к измерениям.

Определение содержания ртути в органах отобранных проб рыб проводилось атомно-абсорбционным методом (ртутный анализатор РА-915+ с приставкой ПИРО-915) в лаборатории Международного инновационного научно-образовательного центра «Урановая геология» (МИНОЦ «Урановая геология») Томского политехнического университета, действующего на основании Положения о Центре от 25.11.2019, соответствующего требованиям ISO 9001:2015. Прибор регулярно проходит поверку. Настоящая схема аналитического прибора основана на принципе Зеemanовской коррекции фона, для исключения снижающих точность измерения факторов, таких как пыль и аэрозоли, по методике М 03-09-2013². Источник излучения помещен в постоянное магнитное поле, под действием которого резонансная линия ртути с длиной волны 254 нм расщепляется на ряд зеemanовских компонент. Предел обнаружения – 0,005 мкг/г, ошибка метода не более 20 %. В качестве стандарта использовали стандартный образец состава мышечной ткани байкальского

окуня Бок-2 (ГСО № 9055-2008). Точность измерений контролировали методом внутреннего контроля.

Результаты исследования и их обсуждение

На рисунке показано содержание ртути в изученных пробах. Средние содержания ртути в пробах рыбы (мышечная ткань) равны соответственно: 173 нг/г (р. Бия, нижнее течение); 120 нг/г (протока ниже с. Соусканиха); 163 нг/г (с. Клепиково); 172 нг/г (протока Малышевская), среднее значение составило 157 нг/г.

Максимальное содержание в мышечной ткани отмечено в р. Бия (173 нг/г), место отбора находится ниже речпорта и жилой застройкой. Близкое значение (172 нг/г) отмечено в рыбах протоки Малышевская, причина чего пока неясна, так как антропогенная нагрузка в этом районе минимальна. Возможно, это связано с рельефом местности. В горной местности содержание ртути в подсистемах окружающей среды может быть выше, чем в равнинных районах [16, 17]. Содержание ртути в пробах рыбы партии II (120 нг/г, протока ниже с. Соусканиха) значительно ниже, чем в остальных (табл. 1).

Наибольшие концентрации Hg приходятся на мышечную ткань, это может быть связано с наличием серосодержащих аминокислот и белков, способствующих связыванию, а также условиями обитания и формой трофического взаимодействия.

По уменьшению содержания ртути в рыбе (рисунок) органы рыб (как щуки, так и окуня) располагаются в следующем ряду (нг/г): мышцы (160) > кишечник (78) > кости (59) > жабры (42) > молоки (34) > икра (15). Среди органов данных видов гидробионтов, по данным настоящего исследования, наибольшую концентрацию ртути содержат мышцы и кишечник, а наименьшую – молоки и икра.

Аминокислоты, содержащиеся в мышечной ткани, благодаря наличию серы, способны образовывать прочные связи с ртутью. Именно поэтому содержание ртути в мышечной ткани выше, чем в других органах. Уменьшение содержания ртути от мышц к икре объясняется особенностями строения рыб. Гонады ввиду их критической значимости для продолжения рода имеют сильную защиту от накопления поллютантов. Другие органы полости тела тоже важны, поэтому занимают срединные позиции между мышцами и икрой.

² ПНД Ф 16.1:2.2.80-2013 (М 03-09-2013) Количественный химический анализ почв. Методика измерений массовой доли общей ртути в пробах почв, грунтов, в том числе тепличных, глин и донных отложений атомно-абсорбционным методом с использованием анализатора ртути РА-915М.

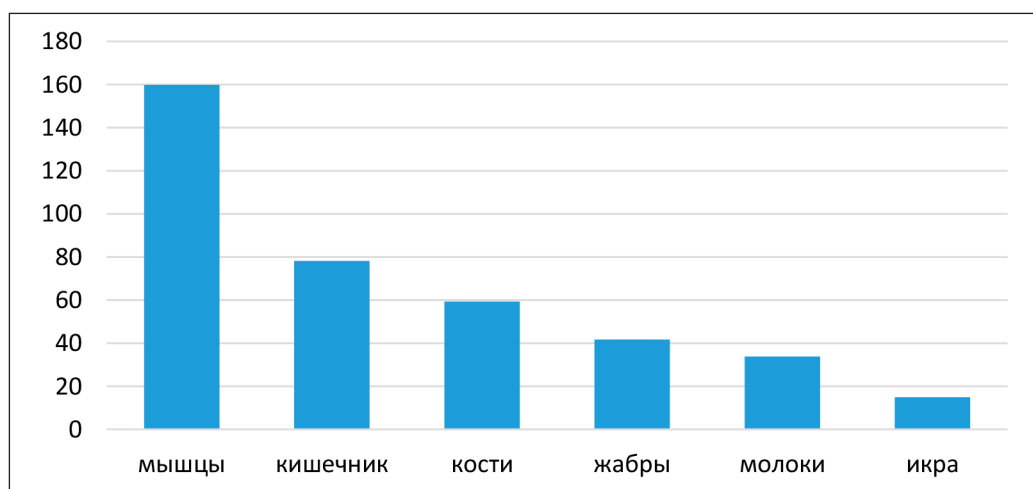
Таблица 1

Содержание ртути, нг/г, в тканях органов рыб в местах вылова

Номер особи	Вид особи	Место вылова	Длина особи, см	Содержание ртути в органах, нг/г					
				мышцы	кости	жабры	икра	кишечник	молоки
1	щука	I	35	$\frac{191 \pm 4}{1}$	$\frac{44 \pm 4}{0,23}$	$\frac{36 \pm 2}{0,19}$	$\frac{6 \pm 1}{0,03}$	$\frac{139 \pm 4}{0,73}$	$\frac{46 \pm 3}{0,24}$
2	щука	I	33	$\frac{177 \pm 7}{1}$	$\frac{24 \pm 1}{0,14}$	$\frac{14 \pm 1}{0,08}$	$\frac{15 \pm 4}{0,08}$	$\frac{52 \pm 1}{0,29}$	$\frac{14 \pm 2}{0,08}$
3	щука	I	32	$\frac{150 \pm 1}{1}$	$\frac{76 \pm 2}{0,5}$	$\frac{21 \pm 2}{0,14}$	$\frac{15 \pm 1}{0,10}$	$\frac{44 \pm 6}{0,29}$	$\frac{43 \pm 1}{0,29}$
4	окунь	II	15	$\frac{118 \pm 1}{1}$	$\frac{60 \pm 4}{0,51}$	$\frac{45 \pm 4}{0,38}$	$\frac{11 \pm 3}{0,09}$	$\frac{78 \pm 7}{0,66}$	$\frac{34 \pm 7}{0,29}$
5	окунь	II	18	$\frac{121 \pm 4}{1}$	$\frac{64 \pm 6}{0,53}$	$\frac{29 \pm 8}{0,24}$	$\frac{14 \pm 1}{0,12}$	$\frac{78 \pm 1}{0,65}$	$\frac{32 \pm 6}{0,27}$
6	окунь	III	18	$\frac{131 \pm 6}{1}$	$\frac{60 \pm 1}{0,46}$	$\frac{42 \pm 5}{0,32}$	$\frac{15 \pm 3}{0,11}$	$\frac{78 \pm 9}{0,60}$	$\frac{34 \pm 5}{0,26}$
7	окунь	III	25	$\frac{196 \pm 6}{1}$	$\frac{71 \pm 3}{0,36}$	$\frac{42 \pm 4}{0,21}$	$\frac{15 \pm 6}{0,08}$	$\frac{78 \pm 4}{0,40}$	$\frac{34 \pm 2}{0,17}$
8	окунь	IV	21	$\frac{209 \pm 4}{1}$	$\frac{86 \pm 6}{0,41}$	$\frac{82 \pm 6}{0,39}$	$\frac{29 \pm 6}{0,14}$	$\frac{78 \pm 4}{0,37}$	$\frac{34 \pm 4}{0,16}$
9	окунь	IV	24	$\frac{171 \pm 3}{1}$	$\frac{55 \pm 2}{0,32}$	$\frac{67 \pm 4}{0,39}$	$\frac{15 \pm 1}{0,09}$	$\frac{78 \pm 5}{0,46}$	$\frac{34 \pm 4}{0,20}$
10	окунь	IV	25	$\frac{136 \pm 1}{1}$	$\frac{54 \pm 5}{0,40}$	$\frac{41 \pm 6}{0,30}$	$\frac{15 \pm 3}{0,11}$	$\frac{78 \pm 4}{0,58}$	$\frac{34 \pm 4}{0,25}$

Примечание: места вылова I–IV описаны в тексте статьи; в числителе – среднее ± среднее квадратичное отклонение при двукратной повторности, доверительной вероятности 0,95; в знаменателе – содержание ртути в органе относительно ее содержания в мышечной ткани.

Составлена авторами на основе полученных экспериментальных данных в ходе исследования



Среднее содержание ртути, нг/г, в различных органах рыб
Примечание: составлен авторами на основе полученных экспериментальных данных в ходе исследования

Максимально допустимое среднее количество ртути в рыбе при заданном уровне потребления (1 порция в неделю) рассчитано по формуле

$$SV = (RfD \times BW) / CR,$$

где SV – максимально допустимое количество ртути в рыбе при заданном уровне потребления (мкг/г), RfD – допустимое ежедневное поступление ртути в организм человека, для расчета бралась величина, рекомендуемая Природоохранным агентством США 0,0007 мкг/г массы человека, BW – масса тела человека (60 кг), г, CR – ежедневное потребление рыбы (150 г/неделю). Оно составило 420 нг/г при заданных ограничениях числа и массы порций в неделю, что в 2,6 раз выше среднего содержания ртути в изученных пробах. Можно сделать вывод, что установленные уровни содержания ртути безопасны для взрослого населения, однако при повышении доли рыбных продуктов в пищевом рационе, что характерно для сельского населения, проживающего вдоль рек, проблема начинает обретать злободневность.

В рамках исследований [14, 15] проведена оценка рисков для человека при заражении рыбы ртутью методом анализа видов и последствий потенциальных отказов (FMEA-анализ).

В рамках FMEA-анализа рабочей группой проведен сбор первичной информации методом мозгового штурма. Состав рабочей группы включал в себя авторов статьи.

Оценка рисков – на основе расчета приоритетного числа рисков (ПЧР) по формуле

$$ПЧР = O \times D \times S,$$

где O – вероятность возникновения риска; D – рейтинг обнаружения; S – рейтинг значимости последствий.

Величина каждой составляющей риска имеет балльную шкалу – от 1 до 10 ед., где 1 – это минимальное значение, а 10 – макси-

мальное. Рейтинг оценки O, D, S представлен в табл. 2.

Таблица 2

Рейтинг оценки O, D, S FMEA-анализа

Рейтинг оценки	Балл
Очень высокая	9, 10
Высокая	7, 8
Умеренная	5, 6
Относительно низкая	3, 4
Низкая	1, 2

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

Исходя из величины ПЧР, руководитель рабочей группы принимает решение о необходимости принятия мер по воздействию на риск:

– ПЧР меньше 40 означает низкий уровень данного риска, в этом случае не требуется принятия мер по воздействию на риск;

– ПЧР больше 40, но меньше 100 означает приемлемый уровень риска, и при этом возможно начать проработку предупреждающих мероприятий по его снижению;

– ПЧР больше 100 означает высокий уровень данного вида риска (критический риск), в этом случае требуется незамедлительная разработка и принятие мер для снижения риска.

Полученные результаты приведены в табл. 3.

Из табл. 3 следует, что уровень принимает пороговое значение «до 40» и все выявленные риски относятся к низким уровням риска и не требуют принятия мер для их минимизации. При этом следует учесть, что практически все пробы отобраны на территориях, где отсутствует антропогенное воздействие. Исключение составляют пробы рыбы, отобранные в реке ниже черты г. Бийска, но и в этом случае содержание ртути не превышает нормы.

Таблица 3

Часть FMEA-анализа при оценке рисков здоровью человека при потреблении рыбы

Риск-фактор	O	D	S	ПЧР
Частота употребления зараженной рыбы	2	2	7	28
Доля рыбных продуктов в пищевом рационе (в том числе зараженной рыбы)	3	2	6	30
Способ приготовления зараженной рыбы	2	2	5	20

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

Заключение

В настоящее время изучение антропогенно ненарушенных территорий представляется весьма актуальным, чтобы получать фоновые, референтные значения для дальнейших измерений и сравнений в условиях антропогенеза. В целом следует рекомендовать ограничивать потребление рыбы, содержащей высокие уровни ртути, а не полностью исключать из рациона. Необходимо проводить специальные оценки на основе использования безопасных доз, а не ПДК, в том числе для детского населения, а при применении метода ФМЕА возможно расширить число факторов риска, принимаемых во внимание. Интеграция анализа ФМЕА с натурными исследованиями и оценкой риска на основе референтных доз может быть использована при контроле качества продуктов рыболовства.

Список литературы

1. Eto K. Minamata disease // *Neuropathology*. Sep. 2000. Vol. 20 (Suppl). P. S14–S19. DOI: 10.1046/j.1440-1789.2000.00295. x.
2. Mufakhir F. R., Yoga G. P., Darusman T., Lestari D. P., Arriyadi D., Utami R. R., Sumardi S., Astuti W., Prasetya H. Mercury risk assessment scenarios: exposure from fish dietary behaviors of Katingan River Basin community // *International Journal of Environmental Health Researches*. 2024. Vol. 34 (9). P. 3317–3333. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38245837/> (дата обращения: 14.03.2026). DOI: 10.1080/09603123.2024.2303980.
3. Sumner J., Ross T., Ababouch L. Application of risk assessment in the fish industry. /FAO Fisheries Technical Paper. № 442. Rome. FAO. 2004. 78 p. URL: <https://www.fao.org/4/y4722e/y4722e00.htm#Contents> (дата обращения: 14.03.2026).
4. Лучшева Л. Н., Ковековдова Л. Т., Назаров В. А. Содержание ртути в промысловых видах рыб озера Ханка // *Известия Тихоокеанского научно-исследовательского рыбохозяйственного центра*. 2000. № 127. № 1–2. С. 559–568. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/soderzhanie-rtuti-v-promyslovyyh-vidah-ryb-ozera-hanka> (дата обращения: 14.03.2026).
5. Гарина Д. В., Тарлева А. Ф. Некоторые показатели биохимического статуса окуней *Perca fluviatilis* (L.) с разным содержанием ртути в мышцах // *Известия Российской академии наук. Серия биологическая*. 2025. № 4. С. 397–406. URL: <https://journals.eco-vector.com/1026-3470/article/view/687621> (дата обращения: 14.03.2026). DOI: 10.31857/S1026347025040045.
6. Arvanitoyannis I. S., Varzakas T. H. Application of ISO 22000 and Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) for industrial processing of salmon: a case study // *Critical Review Food Science Nutrition*. 2008. Vol. 48 (5). P. 411–429. DOI: 10.1080/10408390701424410. PMID: 18464031.
7. Dragan F., Lestyan M., Lupu V. V. et al. The Threat of Mercury Poisoning by Fish Consumption // *Applied sciences*. 2023. Vol. 13 (1). P. 369–379. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/1/369> (дата обращения: 14.03.2026). DOI: 10.3390/app13010369.
8. Борисов М. Я., Иванова Е. С., Тропин Н. Ю., Шилова А. Е., Угрюмова Е. В., Баженова Д. Э. Оценка безопасности употребления в пищу рыбы из водоемов Вологодской области с различным содержанием ртути в мышечной ткани // *Трансформация экосистем*. 2023. Т. 6. Вып. 4. С. 97–118. DOI: 10.23859/estr-230920.
9. Попов П. А. К экологии щуки (*Esox lucius*) реки Оби // *Известия Алтайского отделения Русского географического общества*. 2021. № 1. С. 76–90. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_46302030_91312234.pdf (дата обращения: 14.04.2026).
10. Попов П. А. К экологии речного окуня (*Perca fluviatilis* Linnaeus, 1758) из водоемов Сибири // *Известия Алтайского отделения Русского географического общества*. 2017. № 3. С. 109–120. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-ekologii-rechnogo-okunya-perca-fluviatilis-linnaeus-1758-iz-vodoemov-sibiri> (дата обращения: 17.01.2026).
11. Попов П. А., Андросова Н. В., Попов В. А. Характер накопления ртути в рыбах реки Оби // *Российский журнал прикладной экологии*. 2019. № 4 (20). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/harakter-nakopleniya-rtuti-v-rybah-reki-obi> (дата обращения: 17.01.2026).
12. Гремячих В. А., Ложкина Р. А., Комов В. Т. Пространственно-временная вариабельность содержания ртути в речном окуне *Perca fl* Linnaeus, 1758 (*Perciformes: Percidae*) Рыбинского водохранилища на рубеже XX–XXI веков // *Трансформация экосистем*. 2019. № 2 (2). С. 85–95. URL: <https://www.ecosysttrans.com/publikatsii/transformatsiya-ekosistem-tom-2-2-2019/prostranstvenno-vremennaya-variabelnost-soderzhaniya-rtuti-v-rechnom-okune-perca-fluviatilis-linnaeu/> (дата обращения: 14.02.2026). DOI: 10.23859/estr-180816.
13. Немова Н. Н., Лысенко Л. А., Мещерякова О. В., Комов В. Т. Ртуть в рыбах: биохимическая индикация // *Биосфера*. 2014. № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rtut-v-rybah-biohimicheskaya-indikatsiya> (дата обращения: 14.02.2026).
14. Якушева М. И. Качество управления: оценка рисков пищевой продукции. Инструменты анализа рисков согласно ИСО 22000:2018. URL: <https://kachestvo.pro/kachestvo-upravleniya/instrumenty-menedzhmenta/otsenka-riskov-pishchevyy-produktsii/> (дата обращения: 14.03.2026).
15. Никитченко В. Е., Рысцова Е. О., Чернышева А. Н. Анализ и предупреждение рисков при изготовлении лабораторных микробиологических питательных сред методом ФМЕА // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство*. 2019. Т. 14. № 1. С. 90–98. DOI: 10.22363/2312-797X-2019-14-1-90-98. URL: <https://bio-media.ru/info/articles/analiz-i-preduprezhdenie-riskov-pri-izgotovlenii-laboratornykh-mikrobiologicheskikh-pitatelnykh-sred/> (дата обращения: 14.03.2026).
16. Евстафьева Е. В., Богданова А. М., Евстафьева И. А., Макарова А. С., Мешалкин В. П., Барановская Н. В. Комплексный анализ содержания ртути в подсистемах окружающей среды Крымского полуострова // *Теоретические основы химической технологии*. 2021. Т. 55 (4). С. 452–461. URL: <https://sciencejournals.ru/cgi/getPDF.pl?jid=toht&year=2021&vol=55&iss=4&file=ТОИТ2104005Evstafeva.pdf> (дата обращения: 14.03.2026).
17. Богданова А. М., Евстафьева Е. В., Барановская Н. В., Ляпина Е. Е., Тымченко С. Л., Большунова Т. С. Территориальные особенности распределения ртути в эпифитных лишайниках Крымского полуострова // *Вестник Томского государственного университета. Биология*. 2020. Т. 50. С. 135–156. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/territorialnye-osobennosti-raspredeleya-rtuti-v-epifitnyh-lishaynikah-krymskogo-poluostrova> (дата обращения: 04.03.2026).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.



ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОНИЦАЕМОСТИ ЗЕМНОЙ КОРЫ АПАЧИНСКОЙ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ (КАМЧАТКА)

Сидоров М. Д. ORCID ID 0009-0000-1642-1529

*Научно-исследовательский геотехнологический центр
(Дальневосточное отделение Российской академии наук),
Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация,
e-mail: smd1952z@gmail.com*

Изучена проницаемость земной коры Апачинской геотермальной системы на юге полуострова Камчатка. Целью проведенных исследований является создание объемной модели раздробленности геологической среды, нахождение путей проникновения на глубину атмосферных, циркуляции магматогенных вод и восходящих глубинных флюидов. Район сложен осадочными толщами и отложениями вулканических комплексов. Источником локальных глубинных гидротерм служат питающие каналы кислых субвулканических интрузий карымшинского вулканического комплекса. Из цифровых моделей геофизических полей и радарных снимков рельефа выделены линейменты трещин различного генезиса. В скользящем окне вычислена энтропия и стандартное отклонение во входных данных, проведена линеация и векторизация, построены карты линейментов, которые обработаны по специальной методике. Определен удельный коэффициент раздробленности в кубических блоках. Совокупность блоков образует объемную модель, характеризует проницаемость исследованного участка коры до глубины 3 км. В модели выделены места проникновения атмосферной воды в земную кору, где возможно ее смешение с глубинным горячим флюидом и магматогенными водами: северный склон хр. Гладкий, нижнее течение р. Карымчина, хребет Дальний и верхнее течение р. Ушаган. В модели выделены блоки с интрузиями. В этих блоках по открытым трещинам возможна миграция гидротерм к дневной поверхности. Внутри блоков возможно существование замкнутых систем циркуляции рудоносных растворов и образование золоторудных кварцевых жил. Перспективным представляется юго-восточный фланг выступа меловых пород г. Сопочка. Рекомендована площадь для исследования электропроводности на глубину 3–5 км в комплексе с тепловизионной съёмкой.

Ключевые слова: Камчатка, геотермальная система, субвулканическая интрузия, намагниченность, разлом, модель, линеймент, коэффициент раздробленности

STUDY OF CRUSTAL PERMEABILITY OF THE APACHINSKAYA GEOTHERMAL SYSTEM (KAMCHATKA)

Sidorov M. D. ORCID ID 0009-0000-1642-1529

*Research Geotechnological Center (Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences),
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation, e-mail: smd1952z@gmail.com*

The permeability of the Earth's crust of the Apachinsk geothermal system in the south of the Kamchatka Peninsula has been studied. The purpose of these studies is to create a three-dimensional model of the fragmentation of the geological environment, to find ways of penetration to the depth of atmospheric, circulation of magmatogenic waters and ascending deep fluids. The area is composed of sedimentary strata and deposits of volcanic complexes. The source of local deep hydrotherms is the feeding channels of the acidic subvolcanic intrusions of the Karymsh volcanic complex. From the digital models of geophysical fields and radar images of the relief, the lineaments of cracks of various genesis are selected. In a sliding window, the entropy and standard deviation in the input data are calculated, linearization and vectorization are performed, and maps of lineaments are constructed, which are processed using a special method. The specific coefficient of fragmentation in cubic blocks is determined. The combination of blocks forms a three-dimensional model that characterizes the permeability of the studied section of the crust up to a depth of 3 km. The model highlights the areas where atmospheric water penetrates into the Earth's crust, where it may mix with deep-seated hot fluids and magmatogenic waters: the northern slope of the Gladkiy Range, the lower reaches of the Karimchina River, the Dalniy Range, and the upper reaches of the Ushagan River. The model also highlights the blocks with intrusions. In these blocks, hydrothermal fluids may migrate to the surface through open fractures. Inside the blocks, there may be closed systems of ore-bearing solutions and the formation of gold-bearing quartz veins. The southeastern flank of Sopochka Mountain Cretaceous Period outcrop appears to be promising. The area is recommended for studying electrical conductivity to a depth of 3–5 km in combination with thermal imaging.

Keywords: Kamchatka, geothermal system, subvolcanic intrusion, magnetization, fault, model, fragmentation coefficient, lineament

Введение

Апачинская геотермальная система находится в южной части Камчатского полуострова (рис. 1б). Перспективная площадь охватывает территорию в междуречье Банная – Шикова – Карымчина, в их нижнем те-

чении. В бассейне р. Шикова расположено Апачинское месторождение термальных вод с выходами группы источников. К востоку и югу от источников пробурены две скважины глубиной 507 и 1205 м. Утвержденные эксплуатационные запасы с температурой

64,9°C составляют 2315,5 м³/сут., прогнозируемые ресурсы 30240 м³/сут. [1; 2, с. 109]. На базе естественных источников функционирует лечебно-оздоровительный профи-

лакторий. Кроме информации, полученной при бурении скважин, о глубинном строении Апачинской геотермальной системы мало что известно.

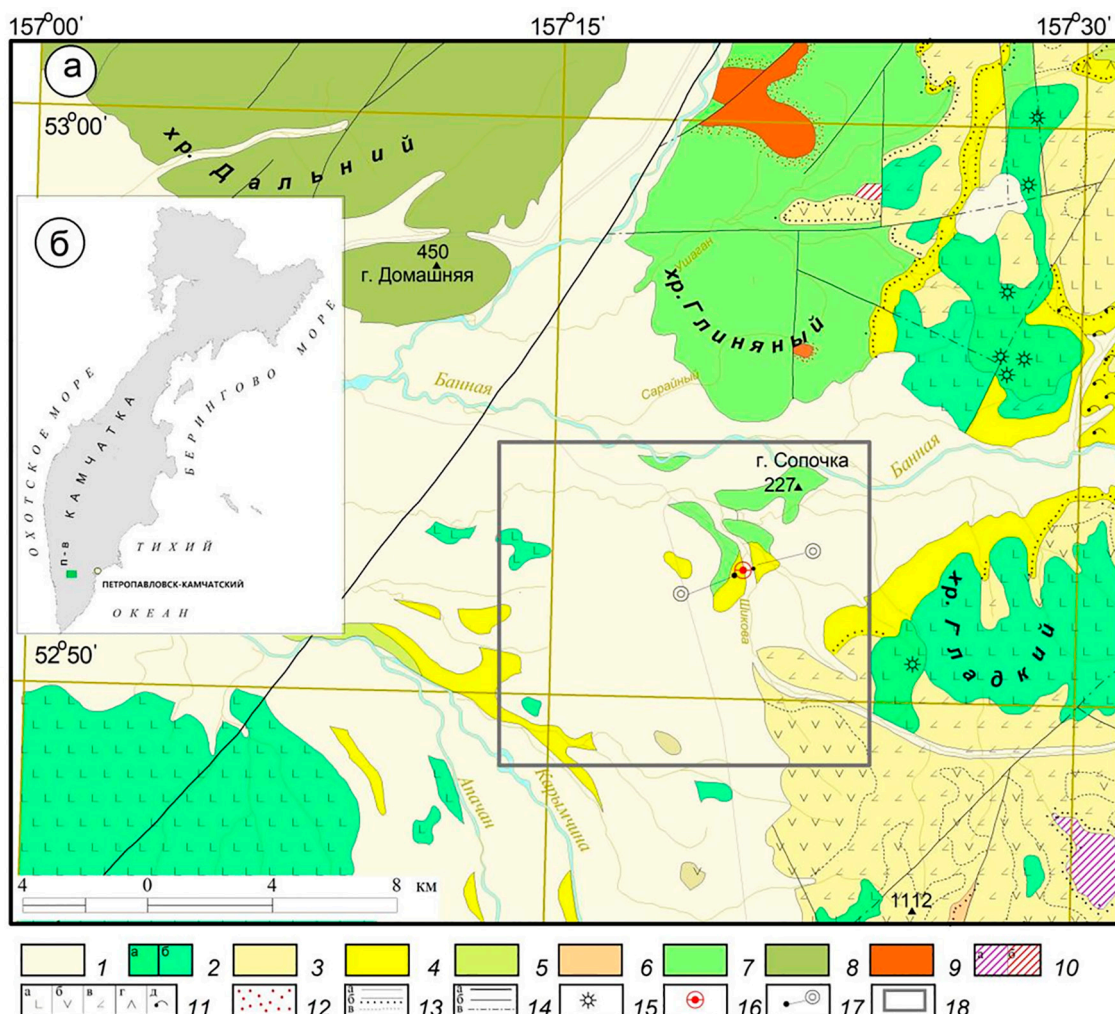


Рис. 1. Геологическая карта (а) [2] и обзорная схема с участком исследований (б). 1 – квартал, рыхлые аллювиальные, пролювиальные, озерные, болотные, ледниковые отложения. Валунники, галечники, щебень, суглинки, пески, глины, торф (до 200 м); 2 – квартал, эоплейстоцен-неоплейстоцен. Сарайненский комплекс базальтовый (а), левоопалинский комплекс базальтовый (б). Покровные образования. Базальты, андезибазальты, их туфы (275 м, 900 м); 3 – кайнозой, плиоцен. Начикинский комплекс базальт-андезибазальтовый. Покровные образования. Андезиты, их туфы, дациандезиты, дациты (800 м); 4 – кайнозой, средний миоцен. Карымишинский комплекс риодацитовый. Игнимбриты, спекшиеся туфы риолитов, дацитов, дациты, риолиты (1000 м); 5 – кайнозой, средний миоцен. Асачинская толща. Песчаники, туфопесчаники, алевролиты, гравелиты (500 м); 6 – кайнозой, палеоген, эоцен. Васильевская толща. Песчаники, алевролиты (750 м); 7 – мезозой, поздний мел. Ирунейская свита, верхняя подсвита. Туфы, туффиты, прослой кремнистых алевролитов, кремней (1500 м); 8 – мезозой, поздний мел. Хозгонская свита. Глинистые сланцы, песчаники, алевролиты (более 3000 м); 9 – мезозой, поздний мел. Левоандриановский комплекс субщелочных габбро, пироксенитов и дунитов. Интрузии монцодиоритов сложного состава; 10 – кайнозой, средний-поздний миоцен. Субвулканические образования андезитов, диоритовых порфиритов южно-быстринского (а), риолитов карымишинского вулканических комплексов (б); 11 – фации вулканических пород: базальты (а), андезиты (б), андезибазальты (в), дациты (г), игнимбриты (д); 12 – контактовые роговики; 13 – геологические границы: согласно (а), несогласно (б) залегания, между фациями (в); 14 – разрывные нарушения: главные (а), второстепенные (б), скрытые под вышележащими отложениями (в); 15 – лавовые и шлаковые конусы; 16 – выходы термоминеральных вод; 17 – буровые скважины; 18 – контур геофизических работ масштаба 1:25000 (Зайцев и др., 1972). Источник: составлено автором на основе [2]

Район сложен осадочными и вулканогенными образованиями, считается перспективным на термоминеральные воды. Проявления гидротерм непосредственно связаны с проницаемостью земной коры, которая во многом является следствием разрывной тектоники. Для оценки тектонической раздробленности обычно анализируют фотоизображение земной поверхности и рельеф. Использование комплекса морфометрических параметров, таких как линии вытянутости водотоков, удельная длина «слабых» зон, кривизна рельефа, рассмотрены в работах [3-5]. Необходимым условием для образования гидротермальных месторождений являются источники тепла, которыми служат магматические тела и их питающие системы. Для прогнозирования месторождений важно знать пути миграции воды внутри коры к источникам тепла и земной поверхности. В данной работе для изучения проницаемости совместно с рельефом рассматриваются данные геофизики: гравиразведки, магниторазведки и электроразведки. Результатом обработки цифровых материалов по специальной методике является 3D-модель раздробленности. Такая модель наглядна, позволяет выявить узлы и зоны проникновения на глубину атмосферных вод, определить вероятные места циркуляции магматогенных вод, восходящих глубинных флюидов, локализовать наиболее перспективные участки для постановки поисковых работ.

Геологическое строение

В геологическом строении [2, с. 15–75] района Апачинской геотермальной системы принимают участие кайнозойские образования различного генезиса и осадочные, вулканогенно-осадочные морские толщи позднего мезозоя (рис. 1а). Меловая система представлена хозгонской и ирунейской свитами. *Хозгонская свита* в описываемом районе сложена терригенными отложениями нижней подсвиты, преимущественно песчаниками с ритмичными пакетами и редкими прослоями алевролитов и глинистых сланцев, линзами конгломератов и гравелитов. На отдельных участках для пород свиты характерен будинаж. Породы свиты практически немагнитные, метаморфизованы в хлорит-мусковитовой субфации зелёносланцевой фации регионального метаморфизма.

Мезозойские толщи являются фундаментом для перекрывающих их вулканогенных отложений кайнозоя. Интрузии мелового возраста представлены одним крупным и одним небольшим массивами на левобережье р. Плотниковой.

Кайнозой на описываемой площади представлен одной осадочной толщей палеогенового возраста и более широко вулканическими комплексами (ВК) неогена и квартера.

Покровные образования *карымшинского ВК* распространены в среднем течении рек Банной и Шиковой, а также в верховьях р. Карымчины. Вулканиты комплекса однообразны по составу и обладают характерным внешним обликом. Субвулканические образования карымшинского ВК приурочены к полям развития покровной фации в виде даек, мелких простых и крупных дифференцированных штоков. В магнитном поле тела отражаются контрастными отрицательными аномалиями. На описываемой площади выходов субвулканических тел нет, но, судя по результатам наземной магнитной съемки, субвулканические интрузии комплекса имеются в междуречье Банная – Шикова, где они перекрыты вышележащими отложениями.

Субвулканические образования *южно-быстринского ВК* представлены на водоразделе Шикова – Карымчина одним телом диоритовых порфиритов. В апикальной части тела породы представляют собой эруптивную брекчию с обломками размером до 15 см.

Начикинский ВК плиоценового возраста распространен в пределах Шиковской вулканической структуры и к северу от нее. Вулканиты залегают несогласно на нижележащих породах карымшинского ВК, в покровной фации характерно преобладание эффузивов. Для начикинского комплекса свойственно дифференцированное, преимущественно положительное магнитное поле с интенсивными максимумами.

Квартер на площади представлен *левоопалинским* и *сарайненским ВК* и рыхлыми отложениями. Покровные фации вулканитов слагают платообразные водоразделы удалённых зон палеовулканов Большая Ипелька и Карымчинского, состоят из базальтов, андезибазальтов, их шлаков и агглютинатов. Фации рыхлых отложений широко представлены в долинах рек Плотникова, Шикова, Карымчина и их притоков, перекрывая мощным до 100 м чехлом другие геологические образования. Генетически это аллювиальные, пролювиальные, пролювиальные континентальных дельт постоянных рек, пролювиальные конусов выноса, ледниковые, водно-ледниковые, болотные отложения. Состав пород многообразен: торфы, илы, глины, супеси, суглинки, пески, гравий, щебень, дресва, галечники, глыбы и валунники.

Таблица физических свойств геологических образований района

Геологические подразделения	Плотность, г/см ³	Магнитная восприимчивость, $n \times 10^{-6}$ ед. СГС	Естественная остаточная намагниченность, $n \times 10^{-6}$ ед. СГС	Удельное электрическое сопротивление, Ом • м
Хозгонская свита	2,66 (2,34-2,70)	24 (2-326)	2 (0-150)	
Ирунейская свита:				
туфы	2,65 (2,10-2,96)	600 (3-4400)	225	
осадочные породы	2,63 (2,31-2,97)	980 (1-3980)	548	
кремнистые породы	2,69 (2,45-2,99)	366 (1-2870)	108	
Васильевская толща	2,54 (2,10-2,75)	320		2800
Асачинская толща	2,41	122	37	750
Южно-быстринский ВК эффузивные породы	2,65 (2,58-2,80)	4100 (90-8200)	1450 (30-4969)	
Карымшинский ВК:				
риолиты	2,2	352 (20-550)	630 (35-2430)	
дациты	2,52	563 (50-1610)	1280 (10-4100)	2200
игнимбриты риодацитов	2,51	230 (15-900)	378 (10-1140)	4500
туфы дацитов	2,41	410 (330-1200)	810 (50-1450)	
Начикинский ВК покровные образования:	-	-	-	
базальты и андезибазальты	2,55 (2,15-2,85)	3041 (36-5100)	1730 (40-17000)	
андезиты	2,48 (1,85-2,86)	1644 (0-5000)	1671 (0-39000)	
дациандезиты	2,42 (1,94-2,65)	1310 (180-2900)	2996 (120-47000)	
дациты	2,46 (2,25-2,65)	843 (26-1600)	1966 (200-28000)	
туфы базальтов	2,18 (1,65-2,67)	1579 (15-2300)	719 (210-2800)	
Левоопалинский и сарайненский ВК	2,53 (2,10-2,74)	1580 (30-3000)	5270 (11-18000)	
Левоандриановский комплекс кварцевые монзониты	2,71 (2,58-2,81)	1808 (18-3900)	118 (1-300)	

Примечания: курсивом показаны средние значения, в скобках диапазон (мин. – макс.). Источник: составлено автором на основе [2, с. 144–146].

Обращает на себя внимание магнитность пород кайнозойских вулканических комплексов (таблица). Кроме магнитной восприимчивости, ответственной за индуктивную намагниченность современным полем, для многих разновидностей пород наблюдается изменяющаяся в большом диапазоне величина естественной остаточной намагниченности (ЕОН), которая формировалась во время образования пород. Если породы намагничивались в периоды с различной полярностью внешнего поля Земли, то суммарный вектор может сильно зависеть от направления вектора ЕОН. Это обстоятельство, вероятно, и отразилось в изменчивости наблюдаемого магнитного поля при наземной съемке.

Влиянием вектора ЕОН, противоположного современному полю, можно объяснить отмечаемые над крупными субвулканическими телами дацитов карымшинского комплекса контрастных отрицательных магнитных аномалий [2, с. 70]. Покровная же фа-

ция комплекса состоит из мелких обломков. Остаточные векторы за счет смещений отдельных обломков (магнитов) разнонаправлены в пространстве, и этот эффект, если и проявился, то незначительно. Поэтому поле над ними более плавное и низкой интенсивности. Описанная особенность магнитных свойств дает возможность по магнитным аномалиям выявить под чехлом рыхлых отложений вероятные на глубине субвулканические тела карымшинского комплекса. Сами интрузии и их питающие системы (каналы) являются источником локальных глубинных гидротерм в районе. Вышесказанное подтверждается магнитным моделированием разрезов.

Апачинская геотермальная система [2, с. 109] состоит из естественных источников и двух скважин, пробуренных вблизи них. Источники находятся на левом берегу реки Шикова, состоят из 15 грифонов, сконцентрированных в трёх группах. Температура основных грифонов 69–72 °С.

Общий дебит естественных выходов 8–14 л/с. В 450 м к востоку от источников пробурена скважина А-1 глубиной 507 м. В интервале 293–507 м вскрыта зона притока термальной воды в вулканогенно-кремнистых породах позднего мела и миоценовых вулканитах. Скважина Г-3 глубиной 1205 м, расположенная в 350 м юго-западнее источников, вскрыла термальные водопритоки в меловых породах начиная с 370 м. Температура повышается с глубиной – от 52 до 77,6 °С. Максимальные водопритоки наблюдаются в наиболее трещиноватых породах. По химическому составу Апачинские гидротермы относятся к хлоридным, гидрокарбонатно-натриевым, азотным, с повышенным содержанием кремнезема, слабощелочным, пресным (Чебыкин, 2002¹).

Собственно Апачинское месторождение расположено в узле пересечения разломов субширотного и северо-восточного направлений. Разломы большей частью предполагаются по данным наземных геофизических исследований методами магниторазведки, электроразведки и сейсморазведки². Циркуляция термальных вод связывается преимущественно с северо-восточными разломами, но не по всей массе вскрытых скважинами пород, а только по отдельным трещинам и трещинным зонам. По аналогии с другими однотипными месторождениями движение термальных вод к поверхности считается восходящим, субвертикальным. Очаг разгрузки расположен в месте расположения источников. Исследования гидрохимическим методом дают основание предполагать, что, кроме известных источников, возможна скрытая разгрузка гидротерм до 30 л/с (Звонцов и др., 1973³).

Существующая концептуальная модель месторождения выглядит следующим образом: водное питание осуществляется атмосферными осадками из области питания, расположенной к юго-востоку от месторождения, в отрогах хр. Гладкого. Из области питания к области разгрузки инфиль-

трационные воды на глубине мигрируют в северо-западном направлении, где они концентрированным потоком перемещаются к дневной поверхности. Нагрев холодных вод, проникающих на глубину, происходит за счет регионального теплового поля, затем за счет локального источника тепла, в качестве которого предполагается высокотемпературный флюид. За источник флюида принимается неглубокий магматический очаг. Также существует мнение, что источником флюида могут служить интрузии габбро-диоритов (Сысоев и др., 1988⁴).

Как видно из изложенного, кроме собственно Апачинского месторождения, несмотря на множество проведенных на поверхности различных исследований, гидрогеологическая модель района базируется на самых общих гипотетических представлениях, особенно в глубинной части. Поэтому целесообразно изучение проницаемости верхней части земной коры вокруг месторождения методами пространственной статистики данных дистанционных съемок. Это позволит добавить определенности в модель, уточнить положение зон и узлов проникновения атмосферных вод на глубину, прогнозировать наиболее вероятные места циркуляции гидротерм.

Целью исследований является создание объемной модели раздробленности верхнего слоя земной коры в районе Апачинской геотермальной системы.

Материалы и методы исследования

Для линеamentного анализа были использованы материалы гравиметрической и аэромагнитной съемок масштаба 1:200 000 [2], радарных космических съемок SRTM [6], ArcticDEM [7]. В качестве инструментов выявления линеamentов в аномальных геофизических полях и радарных снимках рельефа были применены плагины анализа сетки CET из программного комплекса Geosoft Oasis Montaj (разработчики Peter Kovesi, Jason C. Wong, Mike Dentith, and Shih Ching, FuEun-Jung Holden. Geophysics and Image Analysis Group Centre for Exploration Targeting CET The University of Western Australia) [8]. Плагины CET являются инструментом для анализа текстуры и структуры

¹ Чебыкин И. Н. Отчет о результатах работ на термальные воды на Апачинской геотермальной площади в 1995-2001 гг. с подсчетом эксплуатационных запасов термальных вод (по состоянию на 05.05 2001 г.). ООО «Аква», Елизово, 2002.

² Зайцев И. М., Осьмакова А. М., Бубнов В. Д., Матвеев А. Д. Отчёт о комплексных геофизических исследованиях в районе Апачинского термопроявления в 1971. ГФЭ КТГУ, п. Елизово, 1972.

³ Звонцов Ю. Н. (отв. исполнитель). Геологическое строение и гидрогеологические условия района Апачинских гидротерм (часть листа N-57-XXVI). Отчёт о геологосъемочных и гидрогеологических работах масштаба 1:50000 в районе Апачинских гидротерм, проведенных Апачинским гидрогеологическим отрядом в 1971-1972 гг. КТГУ, ГПП, п. Термальный, 1973.

⁴ Сысоев Б. К. Отчет о поисковых геофизических работах в пределах Паратунского месторождения гидротерм и его флангах, а также опытно-методических работах по обобщению геофизических исследований при поисках термальных вод по объектам Камчатской области, проведенных Паратунской партией в 1987-1988 гг. в 2х книгах. Книга 2. Обобщение геофизических исследований при поисках термальных вод по объектам Камчатской области. ЕГФЭ, Елизово, 1988.

сеток (гридов) исходных цифровых данных о рельефе, геофизических аномалиях, определения линеаментов, нахождения границ и пороговых значений областей с различной морфологией и внутренней структурой.

Текстурный анализ. Для исследования текстуры входной сетки данных проводится вычисление энтропии и стандартного отклонения в скользящем окне.

Энтропия. Плагин *энтропия* измеряет в наборе данных статистическую случайность значений окрестности. Сначала данные квантуются в отдельные ячейки, а затем анализируется общее количество различных значений, полученных в результате этого квантования. Для каждой ячейки i в окрестности размером $k \times k$ формируется гистограмма и вычисляется энтропия по формуле:

$$E = -\sum_{i=1}^n p_i \log p_i, \quad (1)$$

где вероятность p получается после нормализации гистограммы n ячеек.

Выходная сетка содержит реальные значения, указывающие величину случайности, проявляемую текстурой в окрестности каждой ячейки. Участки исследуемой территории с высокой статистической случайностью обладают высоким уровнем энтропии, участки с небольшим уровнем случайности имеют низкую энтропию.

Стандартное отклонение. Стандартное отклонение предоставляет оценку локального изменения входных данных. Для каждого местоположения вычисляется стандартное отклонение значений данных в локальной окрестности. Значимые признаки проявляют высокую изменчивость по отношению к фоновому сигналу. Для окна, содержащего N ячеек, среднее значение которых равно μ , стандартное отклонение σ от значений ячейки x_i задается формулой:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2} \quad (2)$$

В выходных данных значения σ , приближающиеся к нулю, указывают на очень малую вариацию, тогда как большие значения – на высокую вариацию.

На следующем этапе обработки проводится выявление линейных элементов в структуре исследуемых данных – линеация. Для этого используются плагины: *фазовая симметрия*, улучшающая внешний вид линейных элементов, и *соответствие фаз*, которое находит разрывы (или ребра).

Методы обнаружения границ на основе градиента обнаруживают границы ступеней большинства магнитных и гравитационных аномалий, которые представляют собой полосы плавно меняющихся значений. Преобразование *фазовой конгруэнтности* представляет собой метод обнаружения границ, не зависящий от контраста, основан на наблюдении локальных пространственных частот. В методе используется тот факт, что краевые особенности возникают в точках, где компоненты локальной частоты максимально совпадают по фазе. После линеации проводится линейная векторизация.

Для генерации скелетных оценок объектов сетки существуют три способа, реализованные в соответствующих плагинах: *пороговое значение амплитуды*, *скелетонизация*, которые сводят области объектов к тонким линиям; *скелет в векторы*, который экспортирует тонкие линии скелета в векторы. Пороговое значение амплитуды используется для поиска гребней. Низкие значения подавляются, в то время как точки локальных максимумов сохраняются. Для каждой ячейки в сетке анализируются значения на расстоянии r в направлениях, перпендикулярных ориентации локального объекта, которая представляет собой направление «горного хребта» или «долины». Если ячейка имеет значение большее, чем значения по обе стороны от нее, ячейка сохраняется, поскольку это локальный максимум, в противном случае оно устанавливается равным нулю. При использовании порогового значения ячейки в сетке помечаются либо как ячейки «переднего плана», либо как ячейки «фона» в зависимости от того, больше или меньше значение ячейки заданного порогового значения. Определение порога амплитуды применяется к выходным данным о фазовой симметрии и фазовой конгруэнтности, отображающих только линии тренда.

Скелетонизация. Этот плагин создает базу данных Geosoft (.GDB) с координатами точек вдоль каждой скелетонизированной линии и наносит эти линии на карту.

Структурный анализ. Плотность возникновения контактов. Плагин генерирует карту с высокой плотностью структурных контактов, которые включают сочленения и пересечения различных конструкций, где сами конструкции имеют значительные изменения ориентации.

Энтропия ориентации – формируется гистограмма ориентаций, и энтропия вычисляется по формуле (1). Плагин выделяет области, где структуры расположены в широ-

ком диапазоне ориентаций, указывая области потенциальной структурной сложности.

Сжатие динамического диапазона с сохранением фазы. Этот фильтр предназначен для выявления едва заметных особенностей на изображениях с высоким динамическим диапазоном, таких как сетки аэромагнитных полей. Результаты обработки приведены на рис. 2.

После редактирования shape-файлов и удаления заведомо ложных линеаментов, образованных за счет краевых эффектов вдоль рамки исследованной площади синтезирована сводная схема линеаментов. Эта схема далее служила основой для построения объемной модели раздробленности коры по специальной методике (см. ниже).

Для количественной интерпретации геофизических аномалий, построения разрезов и магнитного моделирования были использованы материалы геофизических работ масштаба 1:25 000 на участке «Горячие ключи». Аналоговые карты изодинам ΔZ (рис. 3а) и изолиний ρ_k (рис. 4а) электропрофилирования установкой А300_М100N_300В были

оцифрованы и преобразованы в грид-файлы по сети 100×100 м. Магнитное поле из единиц напряженности (мЭ) переведены в единицы магнитной индукции (нТл).

Грид-файл магнитного поля был использован при анализе аналитического сигнала и определения особых точек. Для нахождения глубин методом деконволюции Эйлера была рассчитана сетка (рис. 3б) аналитического сигнала на основе предварительно построенных сеток (гридов) производных dx , dy , dz . Аналитический сигнал представляет собой квадратный корень из суммы квадратов производных по координатным осям x , y и z . Аналитический сигнал полезен при определении местоположения краев тел магнитных источников, особенно там, где остаточная намагниченность усложняет интерпретацию. Результаты интерпретации вошли в стартовую модель разреза. Все расчеты и построения проведены программным комплексом Geosoft Oasis Montaj и модулем Euler-3D deconvolution. Моделирование проведено программой GM-SYS Profile.

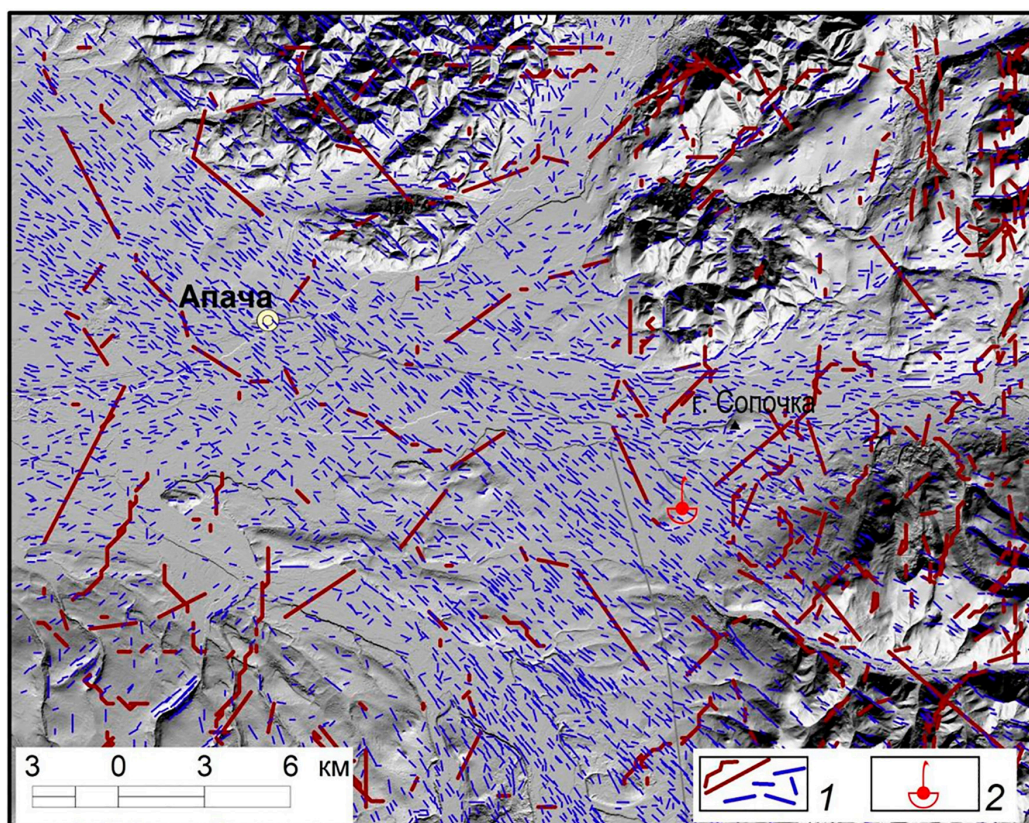


Рис. 2. Схема линеаментов результатов обработки материалов региональных геофизических и радарной съемок: 1 – линеаменты, выделенные по аномалиям Буге и $(DT)_a$ (коричневые линии) и рельефа (синие линии); 2 – выходы термальных вод на дневной поверхности
Примечание: составлено автором по результатам данного исследования

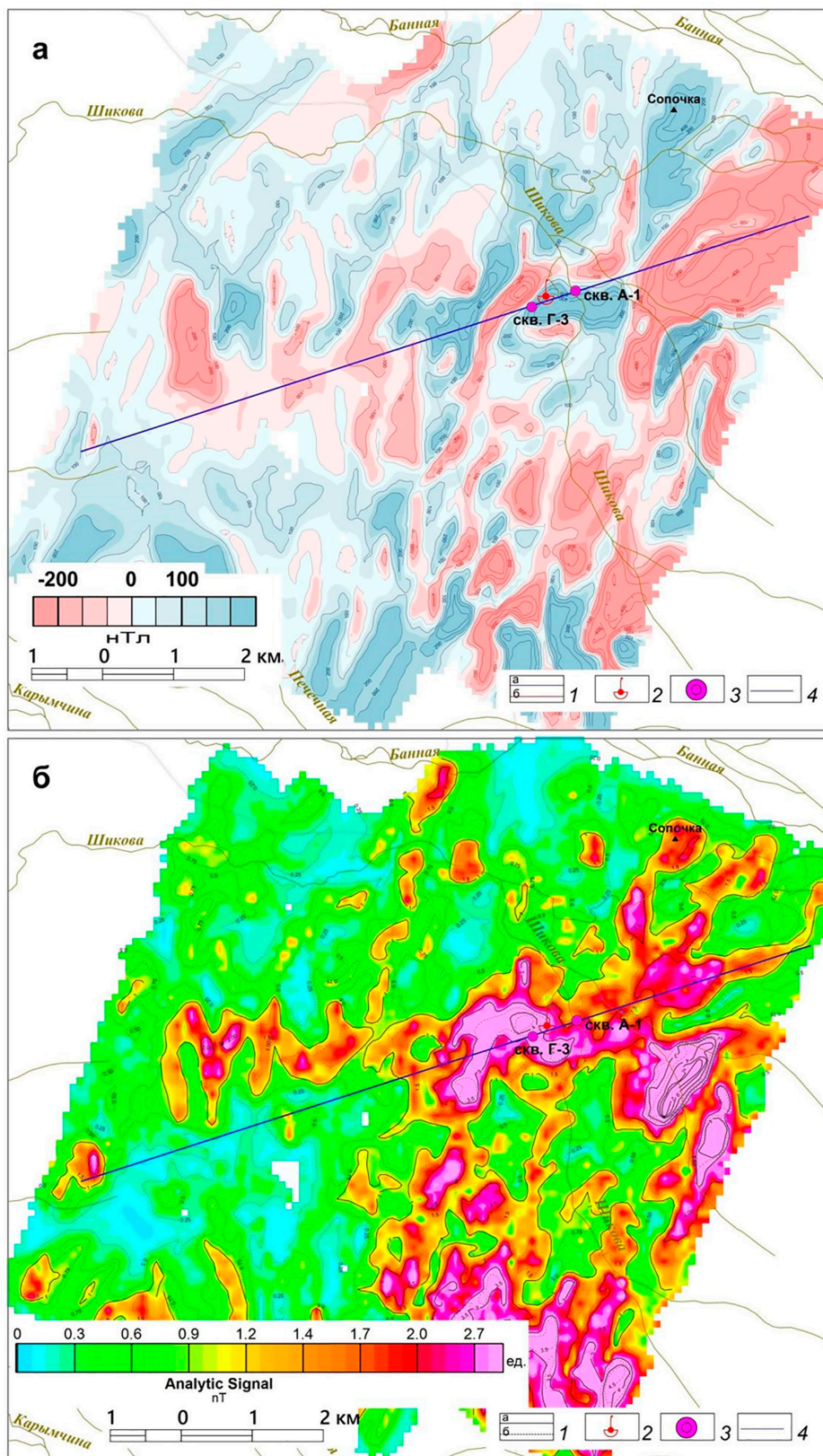


Рис. 3. Карты аномалий магнитного поля (а) и аналитического сигнала (б): 1 – изолинии: на схеме а – положительные (а), отрицательные (б), на схеме б – основные (а), промежуточные (б); 2 – выходы термальных вод; 3 – скважины; 4 – линия разреза
 Источник: составлено автором на основе (Зайцев и др., 1972) и по результатам данного исследования

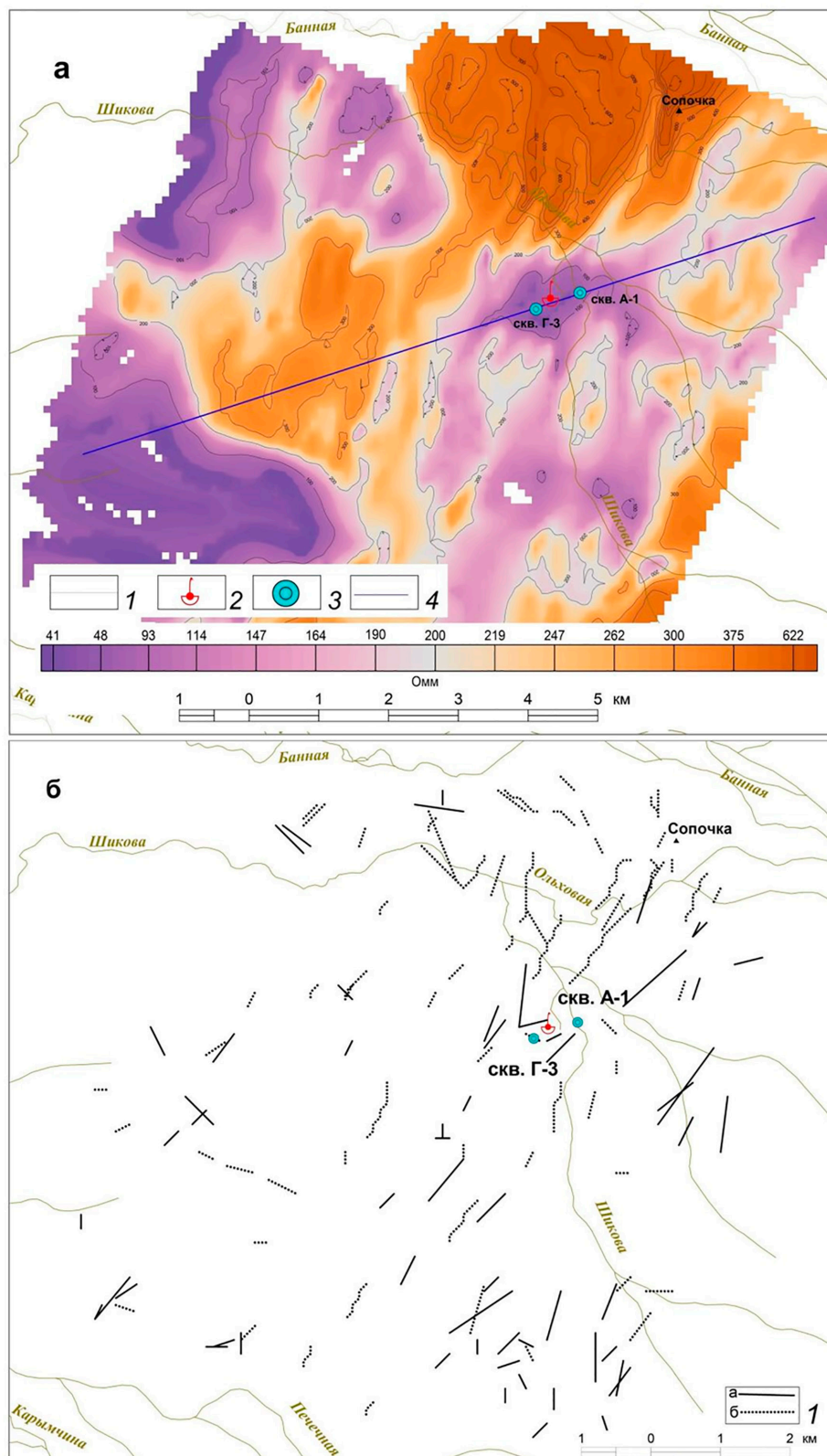


Рис. 4. Карта кажущегося сопротивления симметричного электропрофилирования (а) и линеаментов (б). 1 – изолинии: на схеме а – ρ_a , Ом · м, на схеме б – линеаменты, выделенные по результатам магнитной съемки (а) и электропрофилирования (б); 2 – выходы термальных вод; 3 – скважины; 4 – линия разреза
 Источник: составлено автором на основе (Зайцев и др., 1972) и по результатам данного исследования

Цифровой материал геофизических съемок масштаба 1:25 000 был обработан по вышеописанной методике (рис. 4б), что позволило провести оценку проницаемости самого верхнего слоя геосреды.

Методика объемного моделирования проницаемости земной коры

Особенности подхода и принятые допущения: подобными считаются объекты, обладающие подобием физических переменных и геометрии. Проявление деформаций макроскопического уровня любого объема земной коры рассматривается как сумма составляющих его деформаций многочисленных объемов. Выделяемые на земной поверхности линеаменты отождествляются с разломами и понимаются как отражение тектонической ситуации всей кристаллической части земной коры [9]. Вышесказанное можно распространить и на линеаменты, выделяемые по радарным снимкам рельефа и особенностям геофизических аномалий. Раздробленность геосреды формируется совокупностью трещин, образующихся в зоне динамического влияния разлома. Областью динамического влияния [10, с. 98] является часть окружающего разлом пространства. Линеаменты отражают пространственное положение осевых линий этих зон. Отдельные трещины, из которых состоят зоны динамического влияния, и ширина самих зон не определяются, так же как тип разлома и глубина его проникновения. Скрытые разломы в модели не представлены, кроме разломов по геофизическим аномалиям. Это могут быть, например, древние разломы в фундаменте картируемых на поверхности геологических структур или субгоризонтальные разломы на глубине. В линеаментах может быть частично представлена трещиноватость нетектонического происхождения (контракционная, литогенетическая). «Геофизическими» линеаментами может отражаться трещиноватость на контакте интрузий с вмещающей средой. В совокупности все это формирует проницаемость коры. Если дать количественную оценку линеаментов, то можно определить проницаемость среды и вероятные пути миграции подземных вод. Ниже приведено краткое описание одного из способов такой пространственной количественной оценки.

Эмпирическое правило, установленное Ю. В. Нечаевым на образцах различных горных пород: трещиноватость, видимая на одной грани кубика породы, отражает степень трещиноватости всего образца [9].

Основываясь на принципах подобия, можно применить это правило при рассмотрении кубических блоков земной коры.

Дать количественную оценку проницаемости некоторого объема геологической среды можно с помощью коэффициента тектонической раздробленности. Коэффициент раздробленности (Kp) равен отношению общего объема всех трещин в рассматриваемой среде к ее объему. Так, для блока в виде куба с горизонтальной верхней гранью и ребром равным a , объем трещин (Vm) определяется как сумма произведений длины, ширины раскрытия и глубины проникновения отдельных трещин:

$$Vm = \sum lbh, \quad (3)$$

где l , b и h – длина, ширина и глубина проникновения, соответственно. Тогда:

$$Kp = \sum lbh/a^3. \quad (4)$$

Если совместить верхнюю грань куба с дневной поверхностью и спроецировать на нее выявленные линеаменты, то эти данные можно использовать для определения коэффициента раздробленности. Однако измерить можно только длину линеамента (l). Ширина (b) не определяется, но может быть принята равной некоторой постоянной средней величине для локализованной территории, например равной 1 в метрике карты линеаментов. Также предположим, что линеаменты характеризуют разломы и их глубина превышает величину a , тогда при $b = 1$ и $h = a$ формула (4) примет вид:

$$УДЛ = \sum l/a^2, \quad (5)$$

где в числителе сумма длин линеаментов на верхней грани куба, в знаменателе ее площадь. Вычисляемый по этой формуле параметр равен удельной длине линеаментов (УДЛ) и показывает степень раздробленности блока коры кубической формы, одна из граней которого находится на земной поверхности. Учитывая отмеченное выше правило и считая однородными реологические свойства среды для каждого уникального кубического блока, вычисленные для верхней грани УДЛ можно соотнести с центром куба. Это позволяет задавать глубину исследования путем изменения длины сторон кубических ячеек.

Исходными материалами для создания объемной модели проницаемости стали схемы линеаментов, полученных при обработке материалов региональных геофизических (гравиметрической и аэромагнитной) и радарных съемок рельефа (рис. 2). Для ха-

характеристики проницаемости самого верхнего слоя были использованы линеаменты, выявленные по материалам детальных геофизических исследований в масштабе 1:25 000 (рис. 4б). Для этих данных, судя по глубинам до особых точек, определенных методом деконволюции Эйлера, линеаменты характеризуют слой от дневной поверхности до глубины 300–500 м ниже уровня моря.

Вычисления УДЛ проводились в следующем порядке. Сначала была составлена цифровая карта линеаментов в прямоугольных координатах СК-42. На карту накладывался прямоугольный шаблон-сетка с узлами, расположенными через 1 км. Образованные квадратные клетки являлись верхними гранями кубов. В этом случае площадь элементарной ячейки равна 1 км², а центры кубов располагаются ниже верхней грани на расстоянии 0,5 км. Затем, в каждой клетке, подсчитывалась суммарная длина линеаментов и УДЛ по формуле (5) и определялись координаты центров клеток. В результате была составлена матрица УДЛ для глубины 0,5 км, которая представляет собой файл точек с координатами X, Y, Z и значения УДЛ в них. Сначала за нулевую отметку принят уровень моря. Но так как исследуемая площадь расположена в горной местности, то очевидно, что верхние грани смежных элементарных кубов расположены на разной высоте. Поэтому была введена поправка на рельеф, которая равна абсолютной отметке в центре верхней грани каждого куба, то есть Z-координаты центров кубов были «приподняты» на соответствующую величину.

После создания матрицы (файла) УДЛ для кубов 1×1×1 км размер ребра элементарного куба увеличивался и расчеты повторялись. Шаг увеличения расстояния между узлами накладываемой квадратной сетки составил 0,2 км, что соответствует масштабу исходных карт (1 мм карты – 200 м), и это позволило увеличивать глубину с шагом 0,1 км. Всего было проведено 30 циклов вычислений УДЛ. Эти параметры обеспечили исследование проницаемости продуктивного слоя, доступного для бурения разведочных скважин. Вся цифровая обработка данных проведена в ГИС ArcView [11].

В итоге получены матрицы (файлы), характеризующие послойно раздробленность в интервале от дневной поверхности до глубины 3 км. Далее все файлы были слиты в единый файл базы данных (БД) УДЛ. Эта база использована для создания объемной

модели раздробленности. Объемная модель построена интерполяцией значений УДЛ всех точек БД. Интерполяция проведена методом «3D Кригинг» стандартным модулем Oasis Montaj Geosoft Software. Так получено объемное изображение раздробленности с размером ребра вокселя (элементарного изображаемого куба объема) 0,2 км. Из 3D-модели получены горизонтальные и вертикальные сечения в виде карт и разрезов.

Глубинность исследования достигается увеличением размера элементарных кубических ячеек, на верхней грани которых определяется УДЛ. Этот прием представляет по своей сути зондирование на глубину. Чем больше размер кубической ячейки, тем больше вклад в УДЛ дают линеаменты (разломы), имеющие региональное и глубинное распространение, а доля небольших «мелких» разломов уменьшается.

Такая же процедура была проделана с картой линеаментов детальных геофизических работ. Была использована шаблон-сетка 0,2×0,2 км, шаг увеличения 0,2 км и 10 циклов вычислений УДЛ. В результате построены модель для самой верхней части исследованной территории и срез на горизонте 100 метров выше уровня моря.

Результаты исследований и их обсуждение

Обзорная объемная модель раздробленности бассейна р. Шикова характеризует проницаемость верхних горизонтов земной коры в междуречье Плотникова – Банная – Карымчина и представляет собой совокупность кубических блоков размером 200×200×200 м с различной величиной УДЛ. Общий вид раздробленности коры представлен на блок-диаграмме (рис. 5а).

Как видно, исследованный район весьма неоднороден по степени раздробленности геологической среды как по латерали, так и на глубину. Это предполагает и значительное различие проницаемости в разных частях территории. Величина УДЛ изменяется в широких пределах – от 0,1 до 7 ед. Абсолютно «целых» блоков нет. Характерно мозаичное чередование разрушенных и относительно целых блоков. Многие наиболее раздробленные блоки на глубине образуют единые проницаемые зоны. Сквозную в модели (более 3 км) глубину проникновения имеют раздробленные блоки в долине р. Банная и блок к востоку от г. Сопочка. Обширная проницаемая зона охватывает северные склоны хр. Гладкий.

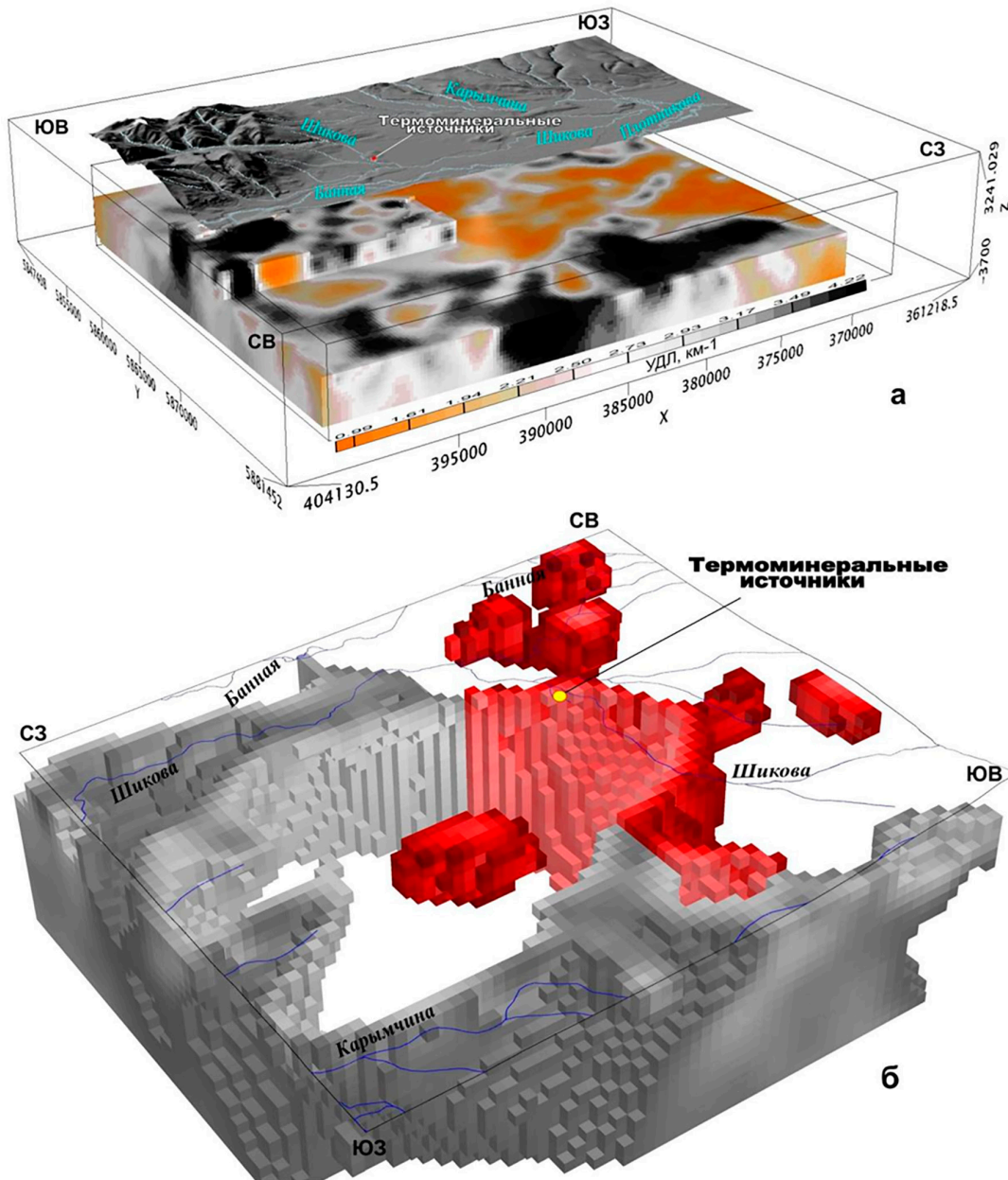


Рис. 5. Общий вид объемной модели раздробленности в бассейне р. Шикова, вид с северо-востока (а), и блоки модели, где наиболее вероятна циркуляция подземных вод, в т. ч. термальных (выделены красным цветом), вид с юго-запада (б). Часть ячеек погашена, размер ребра элементарных кубических ячеек 0,2 км. На диаграмме (а) для наглядности поверхность с рельефом приподнята на 2 км и драпирована изображением радарной съемки
Примечание: составлено автором по результатам данного исследования

Второй глубинный участок с аномальной раздробленностью представлен широтной полосой в северной части исследованной территории: хребет Дальний – верхнее течение р. Ушаган. Еще одна глубинная проницаемая зона, состоящая из двух изометричных узлов, располагается в нижнем течении р. Карымчина. Можно предполагать, что через эти проница-

емые участки атмосферная вода наиболее активно проникает вглубь земной коры, т. е. они являются «питающими» системами холодных метеорных вод. На глубине холодные воды смешиваются с магматогенной водой и, возможно, с глубинным флюидом. Далее горячая вода по открытым трещинам разломов мигрирует к дневной поверхности.

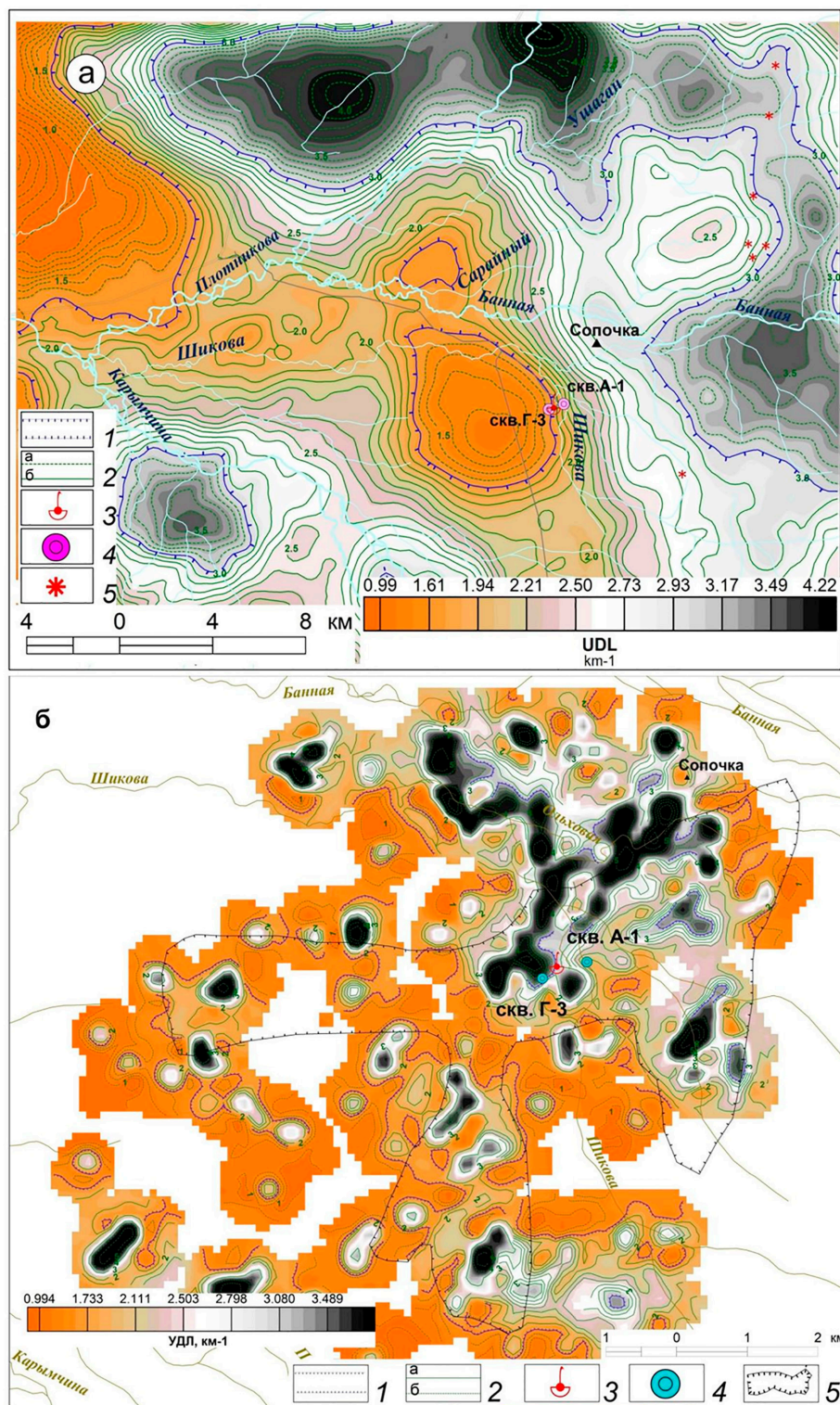


Рис. 6. Горизонтальный срез модели раздробленности коры на горизонтах -3 км (а) и 0,1 км (б). 1 – границы перспективных на термоминеральные воды переходных зон между сильно и слабо раздробленными блоками. Границы проведены по среднему в срезе значению УДЛ \pm дисперсия. Сечение изолиний 0,2 ед. УДЛ; 2 – изолинии УДЛ, км^{-1} внутри перспективных участков (а), за пределами перспективных участков (б); 3 – выходы термальных вод; 4 – скважины; 5 – шлаковые конусы (на схеме а), площадь, рекомендуемая для поисков перспективных аномалий проводимости методами электроразведки (на схеме б)
Примечание: составлено автором по результатам данного исследования

Источником магматогенной воды могут служить кислые субвулканические интрузии карымшинского вулканического комплекса и питающие их каналы. Косвенно о наличии таких интрузий свидетельствуют контрастные отрицательные аномалии магнитного поля, выявленные в бассейне р. Шикова (рис. 3а), и повышенное содержание кремнекислоты в воде апачинских гидротерм. Положение наиболее ярких аномалий этого типа хорошо видно на карте аналитического сигнала (рис. 3б). Отрицательные аномалии обязаны противоположным современному полю намагничиванию пород интрузий. Это предположение было проверено магнитным моделированием через район источников. При моделировании методом подбора вычисляется теоретическая аномалия по гипотетическому корректируемому разрезу и сравнивается с графиком, наблюдаемым приборами. Действительно, на участках отрицательных аномалий в разрезе выделяются тела с вектором намагничивания, направленным в верхнее полупространство.

Для этих тел существенный вклад в направление вносит вектор естественной остаточной намагниченности. В разрезах скважин А-1 и Г-3 участки пересечения совпадают с «горизонтом» липаритов-дацитов. Скорее всего, это апофизы от расположенных близи субвулканических тел, которые и моделируются по аномальному полю. Таким образом, можно считать, что в местах интенсивных отрицательных аномалий на глубине есть потенциальные источники тепла в виде корней (питающих каналов) субвулканических интрузий карымшинского комплекса, а в блоках, которые их вмещают, вероятно циркуляция гидротерм (рис. 5б).

Максимально раздроблен самый верхний слой, от поверхности коренных пород до глубины примерно 1000 метров ниже уровня моря. Это объясняется тем, что кроме тектонических трещин разрушения горных пород добавляется еще влияние процессов «выветривания», которые вносят свою долю в раздробленность среды и выявляются как линеаменты при анализе рельефа.

Линеаментный анализ космо- и аэроснимков в бассейне реки Налычева, на востоке Камчатки, обнаружил пространственную закономерность – выходы термальных вод на дневную поверхность расположены в краевых частях блоков с аномально высокой раздробленностью, в зоне перехода к слабо раздробленным блокам [12]. На острове Парамушир такая зависимость

наблюдается для Верхне-Юрьевских термальных источников [13; 14]. В центральной части острова Итуруп также большинство источников расположены в переходной зоне [15; 16]. Относительно «целые» блоки, как правило, содержат внутри интрузии и эктрузии. На Камчатке это тела преимущественно кислого состава, а на Курильских островах – основного. Для оценки ширины зон опытным путем установлено, что большинство выходов гидротерм расположены в полосе шириной \pm дисперсия от среднего значения УДЛ. Следуя этому правилу, на срезах (рис. 6) и разрезе (рис. 7) магнитной модели были проведены границы перспективных участков, где наиболее вероятно обнаружение термоминеральных вод.

Заключение

Методами пространственной статистики изучена проницаемость земной коры Апачинской геотермальной системы. В результате обработки цифровых данных дистанционных зондирований (радарных съемок рельефа, гравиметрической, аэромагнитной съемок, электропрофилеирования и наземной магниторазведки) создана объемная модель раздробленности геологической среды до глубины 3 км ниже уровня моря. Анализ сеток (гридов) аномальных геофизических полей и радарных снимков рельефа выявил линеаменты, которые характеризуют трещины разного генезиса. По длине и плотности линеаментов вычислен удельный коэффициент раздробленности в элементарных кубических блоках переменного размера. Совокупность блоков образует объемную модель исследованного участка земной коры. В модели отчетливо проявились места проникновения атмосферной воды в земную кору на значительную глубину, где возможно ее смешение с горячими магматогенными водами и глубинным флюидом. Области питания метеорными водами расположены на северных склонах хр. Гладкий, в нижнем течении р. Карымчина, на хребте Дальний и в верхнем течении р. Ушаган.

Пути фильтрации локальных глубинных гидротерм служат питающие каналы кислых субвулканических интрузий карымшинского вулканического комплекса. Интрузии не обнажены на исследованной территории, но в магнитном поле отражаются контрастными отрицательными аномалиями. По этому признаку в модели раздробленности выделены блоки, которые содержат интрузии. В блоках наиболее вероятно циркуляция термальных вод и, при

наличии открытых трещин, возможна их миграция к дневной поверхности. Открытые трещины образуются на краях поднятых блоков фундамента. В этой связи одним из перспективных участков представляется юго-восточный фланг выступа меловых пород г. Сопочка. Также внутри блоков на контактах вмещающих толщ с кислыми субвулканическими телами карымшинского вулканического комплекса вполне вероятны замкнутые системы циркуляции горячих рудоносных растворов и образование золоторудных кварцевых жил. Жилы могут быть подобны жилам Порожистого рудного поля, расположенного юго-восточнее в 12–15 км. Исходя из изложенного, рекомендуется провести изучение электропроводности геосреды методом магнитотеллурического зондирования до глубины 3–5 км в комплексе с тепловизионной съёмкой. Примерные границы перспективной площади для исследований показаны на рис. 6б.

Список литературы

1. Черных Е. В., Рычкова Т. В. Апачинские термальные источники как часть экосистемы и их рациональное использование // Вестник Камчатского государственного технического университета. 2009. № 10. С. 54–60. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15604620> (дата обращения: 12.02.2026). EDN: NDMJOX.
2. Боровцов А. К., Ярыш Г. В., Бархатов Ю. В., Щенко В. И., Хасанов Ш. Г. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. Серия Хангарская. Лист N-57-XXVI (Дальний). Объяснительная записка. М.: МФ ВСЕГЕИ, 2013. 181 с. URL: http://geo.mfvsegei.ru/200k/DM/DigitalModel_N-57-XXVI.rar (дата обращения: 12.02.2026).
3. Агибалов А.О., Бергаль-Кувикас О.В., Зайцев В. А., Макеев В. М., Сенцов А. А. Взаимосвязь морфометрических параметров рельефа, характеризующих трещиноватость верхней части литосферы, и проявлений вулканизма Малко-Петропавловской зоны // Геофизические процессы и биосфера. 2023. Т. 22. № 2. С. 122–133. DOI: 10.21455/GPB2023.2-5. EDN: JPMLSN.
4. Собисевич А. Л., Агибалов А. О., Бергаль-Кувикас О. В., Зайцев В. А., Зыков Д. С., Макеев В. М., Полещук А. В., Сенцов А. А., Шевченко А. В. Развитие методов комплексного морфометрического анализа рельефа для оценки тектонической раздробленности недр // Вулканология и сейсмология. 2024. № 3. С. 59–69. DOI: 10.31857/S0203030624030056. EDN: JQIETW.
5. Сенцов А. А., Собисевич А. Л., Агибалов А. О., Балашов Г. Р., Макеев В. М., Мануилова Е. А., Пузич И. Н., Славина Л. Б. Оценка тектонической раздробленности земной коры Алтае-Саянской области // Геофизические процес-

сы и биосфера. 2025. Т. 24. № 4. С. 120–129. DOI: 10.21455/GPB2025.4-8.

6. Цифровая модель рельефа SRTM. URL: https://www.okmap.org/srtm/version2_1/SRTM3/Eurasia/N52E157.hgt.zip?_gl=1*_mbobfj*_up*MQ..*_ga*NzU0ODQ3Mzk4LjE3NzUyMTM1NTM.*_ga_T1ENF309H9*czE3NzUyMTM1NTMkzbzEkZzAkdDE3NzUyMTM1NTMkajYwJGwwJGgw (дата обращения: 06.02.2026).
7. Цифровая модель рельефа ArcticDEM. URL: http://data.pgc.umn.edu/elev/dem/setsm/ArcticDEM/mosaic/v3.0/2m/79_25/ (дата обращения: 15.02.2026).
8. Eun-Jung Holden, Dentith M., Kovesi P. Towards the Automatic Analysis of Regional Aeromagnetic Data to Identify Regions Prospective for Gold Deposits // Computers & Geosciences. 2008. Vol. 34. № 11. P. 1505–1513. URL: <https://www.sciencedirect.com/journal/computers-and-geosciences/vol/34/issue/11> (дата обращения: 06.02.2026).
9. Нечаев Ю. В. Линеаменты и тектоническая раздробленность. Дистанционное изучение внутреннего строения литосферы. М.: ИФЗ РАН, 2010. 215 с. URL: https://portal.ifz.ru/elibrary/id=ifz_library_838. ISBN: 978-5-91682-007-2 (дата обращения: 06.02.2026).
10. Шерман С. И. Избранные труды: тектонофизика разломобразования и сопутствующих процессов в литосфере. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2017. 1476 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01009512382>. ISBN: 978-5-9908560-1-1 (дата обращения: 08.02.2026).
11. Сидоров М. Д. Создание базы данных для объемного изображения тектонической раздробленности земной коры // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 12 (специальный выпуск 17). С. 60–73. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_12_17_60. EDN: WSWSCP.
12. Sidorov M. D., Taskin V. V The Study of the Permeability of the Upper Crust Part on the Photo Image of the Surface in the Area of the Nalychevo Field of Thermomineral Waters (Kamchatka). IOP Publishing, 2nd International Geothermal Conference, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 249. 2019. 012046. DOI: 10.1088/1755-1315/249/1/012046.
13. Хубаева О. Р., Бергаль-Кувикас О. В., Сидоров М. Д. Идентификация разрывных нарушений северной части о. Парамушир (Курильские острова, Россия) и их взаимосвязь с гидротермально-магматическими системами: 3d моделирование тектонической раздробленности // Геотектоника. 2020. № 6. С. 77–90. DOI: 10.31857/S0016855X20060077/ EDN: LPEHAE.
14. Хубаева О. Р., Бергаль-Кувикас О. В., Сидоров М. Д. Проблема формирования и питания Верхне-Юрьевских термальных источников (о. Парамушир, Курильские острова) // Вулканология и сейсмология. 2022. № 3. С. 43–59. DOI: 10.31857/S0203030622030038.
15. Хубаева О. Р., Сергеева А. В., Хомчановский А. Л., Сидоров М. Д., Батанов Ф. И., Волькин С. С., Назарова М. А. Генезис термального озера в прибрежной зоне о. Итуруп (Курильские острова) // Геодинамика и тектонофизика. 2025. Т. 16. № 1. С. 1–17. DOI: 10.5800/GT-2025-16-1-0813. EDN: QJWVMD.
16. Khubaeva O., Sergeeva A., Khomchanovsky A., Sidorov M., Zakharov S., Degterev A., Novikov U. Hydrothermal-magmatic systems of the central part of Iturup island (The Kuril islands, Russia) // Journal of Volcanology and Geothermal Research. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2026.108565.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.



МИНЕРАЛОГИЯ ЗОЛОТОРУДНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ШАХТНОЕ (ЦЕНТРАЛЬНО-КОЛЫМСКИЙ РЕГИОН)

Чепурнов И. А., Грановская Н. В. ORCID ID 0000-0002-5232-1960

*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Южный федеральный университет», Ростов-на-Дону, Российская Федерация,
e-mail: chepurnov.04@mail.ru*

Месторождение Шахтное локализовано в Урынском золоторудном районе Берелехского рудного узла Яно-Колымского складчатого пояса (Магаданская область). Цель исследования – определение минерального состава и парагенетических ассоциаций руд, локализованных в березитизированных дайках диорит-порфиров позднюрского нера-бохапчинского комплекса (J₃nb). Исследования базировались на данных полевых работ, фондовых геологических материалов, лабораторных анализов (минераграфического, микронзондового, метода масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой и лазерной абляцией). Во время полевых работ произведена документация главного рудного тела в карьере «Шахтный». Отобраны типовые образцы руд и вмещающих пород для аналитических исследований. Установлено, что оруденение относится к дайковому типу золото-кварцевой формации. Сульфиды представлены в основном двумя генерациями пирита и арсенопиритом. Выделяется несколько разновидностей золота: высокопробное самородное в виде отдельных зерен (совместно с жильным кварцем, халькопиритом, сфалеритом, галенитом) и тонкодисперсное в арсенопирите и позднем пирите. Богатые участки рудных тел характеризуются наличием сетчатых кварцево-прожилковых зон со свободным золотом в метасоматически измененных дайковых телах. Аномалии мышьяка в рудоносных дайках являются благоприятным, но недостаточным признаком высоких содержаний золота. Более достоверными являются комплексные аномалии As-Cu-Pb-Zn. Полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования и поисков рудного золота в Урынском рудном районе Центрально-Колымского региона.

Ключевые слова: Урынское рудное поле, месторождение Шахтное, рудная минерализация, Магаданская область, дайки диорит-порфиров, золото-кварцевая формация

MINERALOGY OF GOLD ORE FORMATIONS OF THE SHAKHTNOE DEPOSIT (CENTRAL KOLYMA REGION)

Chepurnov I. A., Granovskaya N. V.

*Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education
“Southern Federal University”, Rostov-on-Don, Russian Federation,
e-mail: chepurnov.04@mail.ru*

The Shakhtnoe deposit is located in the Uryinsky gold ore field of the Berelekh ore cluster within the Yana-Kolyma folded belt (Magadan Region). The aim of the study is to determine the mineral composition and paragenetic associations of ores localized in beresitized dikes of diorite porphyrites of the Late Jurassic Nera-Bohapchinsky complex (J₃nb). The study is based on fieldwork data, archival geological materials, and laboratory analyses (mineragraphic, electron microscopy, inductively coupled plasma and laser ablation mass spectrometry method). During field work, documentation of the main ore body in the “Shakhtny” open pit was carried out. Representative samples of ores and host rocks were collected for analytical studies. It has been established that the mineralization belongs to the dike type of the gold-quartz formation. Sulfides are mainly represented by arsenopyrite and two generations of pyrite. Several types of gold are distinguished: high-grade native gold in the form of individual grains (associated with vein quartz, chalcopyrite, sphalerite, galenite) and finely dispersed gold in arsenopyrite and late pyrite. High-grade sections of ore bodies are characterized by the presence of stockwork quartz-veinlet zones with free gold in metasomatically altered dike bodies. Arsenic anomalies in ore-bearing dikes are a favorable but insufficient indicator of high gold concentrations. Complex anomalies As-Cu-Pb-Zn are more reliable. The obtained results can be used for forecasting and exploration of ore gold in the Uryinsky ore district of the Central Kolyma region.

Keywords: Uryinsky ore field, Shakhtnoe deposit, Magadan Region, diorite porphyrite dikes, ore mineralization, gold-quartz formation

Введение

Золоторудное месторождение Шахтное расположено в Сусуманском районе Магаданской области. Исследуемая территория локализована в пределах Урынского рудного поля Берелехского рудного узла, являющихся частью Яно-Колымского орогенического пояса.

С 1930-х гг. данный район известен уникальной Чай-Урынской россыпью золота, а коренное золото было обнаружено в 1974–1976 гг. при проведении прогнозного бурения (Н. В. Хандожко), в результате которого была выявлена слабая, неравномерная золотоносность даек, размещенных в мощной зоне дробления. На основании последую-

щих поисковых работ (Е. Г. Дубинин, 1996; И. В. Малевич, 1999) была предложена гипотеза о локализации золотого оруденения в крутопадающих кварцево-жильных телах, оперяющих зону Главного Чай-Урьинского разлома. Геологами В. В. Петуховым и др., проводившими поисковые работы в пределах Чай-Урьинской перспективной площади в 1997–2002 гг., впервые обоснована комплексная модель формирования и размещения золотого оруденения жильно-прожилкового, прожилкового и дайкового геолого-промышленных типов. По результатам интерпретации геологических, геофизических и геохимических данных было выявлено перспективное Чай-Урьинское рудное поле, в пределах которого оконтурены три прогнозные зоны. Основные промышленно важные объекты рудного золота Чай-Урьинской площади были открыты и изучались в 2016–2018 гг. ООО «ГРК БарГолд», ООО «Золотодобывающая корпорация», ООО «Статус». К ним относятся рудопоявления Верхний Власыч, Нижний Власыч и месторождение Шахтное, которые в настоящее время объединены в единое Урьинское рудное поле.

Актуальность исследований определяется тем, что в пределах Урьинского рудного поля и всего Берелехского рудного узла продолжают поиски новых рудных тел и необходимы надежные прогнозные признаки для их обнаружения, в том числе явно выраженные минералогические. Несмотря на многолетнее изучение территории, остаются спорными вопросы о рудогенерирующей роли даек, стадийности рудных и прерудных гидротермальных и метасоматических процессов, парагенетических ассоциациях минералов и формах нахождения золота в рудных телах.

Наиболее значимый объект Урьинского рудного поля, месторождение Шахтное, в настоящее время эксплуатируется карьерным способом и наиболее открыто для изучения, поэтому выбрано нами в качестве эталонного объекта для проведения минералогических исследований.

Цель исследования – определение минерального состава и парагенетических ассоциаций руд, локализованных в березитизированных дайках диорит-порфириров месторождения Шахтное.

Материалы и методы исследования

Материалом для исследования являлись выходы рудоносной свиты даек, представляющих собой главное рудное тело место-

рождения Шахтное и вскрытых в карьере «Шахтный» на горизонте 25–35 м.

Методика исследования включала полевые работы, аналитические исследования, обзор и анализ литературных источников и фондовых геологических материалов.

Во время полевых работ осуществлялось детальное обследование месторождения, геологическая документация и опробование рудных зон. Особое внимание уделялось комплексному изучению крутопадающих рудоносных даек с отбором типовых образцов по разрезам главного рудного тела и его апофиз, а также вмещающих пород. Поисковые маршруты проводились в пределах всей Чай-Урьинской площади, что позволило получить общие представления об особенностях рудной минерализации района в целом.

При аналитических исследованиях типовых образцов руд месторождения Шахтное применялись минераграфический, рентгеноспектральный микрозондовый анализ, метод масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой и лазерной абляцией (LA-ISP-MS). В исследованиях использовались рудный микроскоп ЛОМО ПОЛАМ Р-312 (Институт наук о Земле ЮФУ), растровый электронный микроскоп Tescan Vega II LMU, энергодисперсионный микроанализатор INCA Energy 450 XT и волнодисперсионный микроанализатор INCA Wave 700 (ЦКП «Центр исследований минерального сырья и состояния окружающей среды» ЮФУ), масс-спектрометр Thermo XSeries с системой лазерного проотбора New Wave Up213 (Лаборатория анализа минерального вещества ИГЕМ РАН).

При минераграфических исследованиях полированных шлифов руд проводилась диагностика главных, второстепенных и редких минералов с определением их морфологических взаимоотношений, а также выделялись генерации и парагенетические ассоциации минералов на основании перерывов в минералообразовании. Одновременность и последовательность образования минералов выявлялись по структурно-морфологическим признакам (наличию аллотриоморфных сростаний, метакристаллов и метазерен, признакам коррозии и замещения, пересечения, дробления). С помощью микрозондовых анализов подтверждались первичные минералогические данные, уточнялся состав минералов, выявлялись мелкие выделения сульфидов и самородного золота. Использование LA-ISP-MS метода позволило установить наличие и распределение

элементов примесей в главных сульфидных минералах руд – пирите и арсенопирите.

Результаты исследования и их обсуждение

Месторождение Шахтное относится к Урьинскому рудному полю в юго-восточной части Яно-Колымского орогенного пояса и приурочено к сочленению двух региональных структур: Ильяни-Дебинского мегасинклинория и Аян-Юряхского антиклинория, сочленяющихся по Чай-Урьинскому глубинному разлому [1]. Локализацию золоторудных объектов Урьинского рудного поля определяет Главная Чай-Урьинская зона разломов, которая имеет северо-западное простирание, ширину 4–6 км и сопровождается зоной интенсивного смятия и кливажа. На территории развиты терригенные, вулканогенно-терригенные отложения от позднепермского до среднеюрского возраста. Тектоническую структуру района подчеркивают многочисленные дайки кислого состава позднеюрского, позднеюрского-раннемелового и раннемелового возраста, представленных соответственно тремя комплексами: диоритовым нера-бохапчинским (J_3nb), диорит-гранит-гранодиоритовым басугуньинским (J_3b) и гранодиорит-гранитовым таскыстабытским (K_1tk).

С позднеюрскими и меловыми интрузивными комплексами гранитоидного состава связывается большинство плутоногенно-гидротермальных месторождений золота Яно-Колымской металлогенической провинции [2–4].

Дайки диорит-порфириров наиболее древнего позднеюрского нера-бохапчинского комплекса являются рудоносными на месторождении Шахтное и рудопроявлении Верхний Власыч. Они отличаются интенсивными метасоматическими преобразованиями березитового типа. Первичный состав даек устанавливается только по реликтовым структурам, а сами дайки почти нацело сложены вторичными минералами.

Помимо золотоносных даек в пределах Урьинского рудного поля обнаружены линейные минерализованные зоны дробления в осадочных породах с многочисленными кварцевыми телами сложной формы ветренского типа [5] в сочетании с параллельными или оперяющими жилами.

Геологические особенности месторождения Шахтное. Месторождение Шахтное вскрыто карьером, на котором ведется промышленная добыча золота. Рудная минерализация локализована в пределах

субпараллельных метасоматически измененных даек диорит-порфириров, которые пересекаются мощной тектонической зоной. Дайки контролируются разломами северо-западного простирания, которое примерно совпадает с простиранием вмещающих осадочных пород. Вмещающие породы представлены триасовыми алевролитами, углеродистыми аргиллитами с редкими прослоями алевролитов и песчаников.

Рудоносные крутопадающие дайки группируются в свиты, мощностью в центральной части месторождения около 80 м, а на флангах – 20–40 м. Число даек в свитах колеблется от 5 до 12; мощность отдельных даек 1–10 м; прослеженная протяженность по простиранию – до 2000 м, по падению – до 200 м. Обследование фрагмента главного рудного тела в стенке карьера показало, что метасоматически измененные диорит-порфириды перемежаются с маломощными (до первых метров) полосами вмещающих осадочных пород: черных аргиллитов с прослоями известковых песчаников. Дайки содержат осветленные участки с кварцевыми метасоматитами, а также зоны дробления и катаклаза с лимонитизацией и штокверковым кварцевым прожилкованием. Золотое оруденение приурочено к наиболее окварцованным участкам березитизированных даек с пересекающимися паукообразными кварцевыми прожилками и вкрапленной сульфидизацией (рис. 1). В рудных столбах в пределах даек кварц составляет 30–40 %, а иногда до 70 % объема пород. Распределение золота в зонах окварцевания неравномерное (от одного до десятков г/т).

В целом месторождение Шахтное относится к дайковому типу, когда рудными телами являются сами окварцованные и минерализованные дайки [6–8]. Дайковый тип золоторудных объектов широко распространен на территории Северо-Востока России [9, 10].

Минералогия рудных образований. Минеральный состав руд определяется преобладанием жильного кварца с вкрапленностью и гнездами сульфидов (от первых процентов до 5–7 %), наличием видимого мелкого и среднего самородного золота, а также тонкодисперсного золота в пирите и арсенопирите. Среди сульфидов наибольшее распространение имеют пирит и арсенопирит, в резко подчиненных количествах присутствуют сфалерит, галенит, халькопирит и блеклые руды (рис. 2). По данным микроскопических исследований в работе [11] в рудных образованиях месторождения Шахтное отмечался также пирротин.

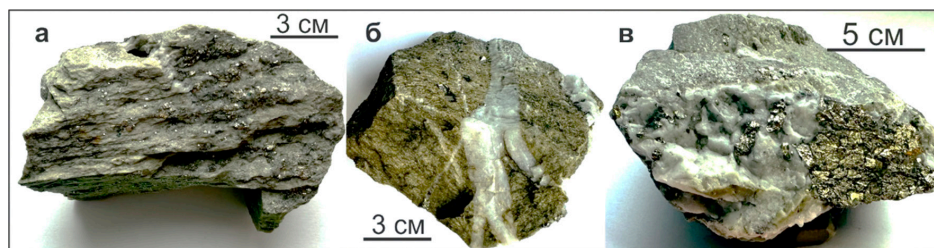


Рис. 1. Типовые образцы из рудоносной дайки: а – окварцованный диорит-порфирит с вкрапленностью сульфидов; б – сетчато-кварцевые прожилки в березитизированных диорит-порфиритах; в – пирит в кварцевом прожилке
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

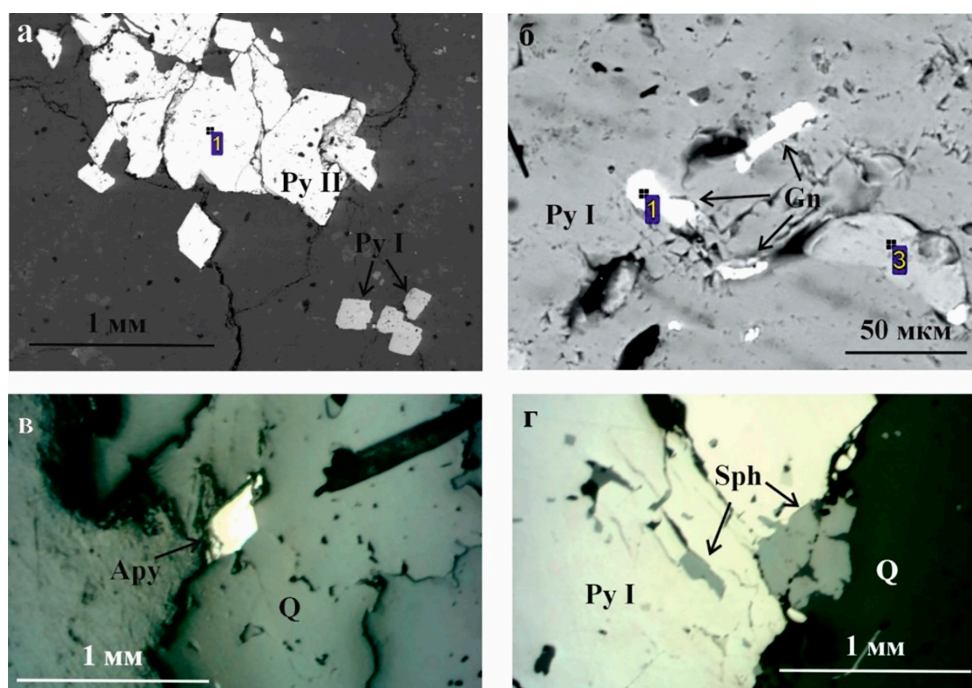


Рис. 2. Сульфидные минералы в кварцевых жилах и метасоматитах: а, б – микрофотографии в отраженных электронах: а – метакристаллов пирита-1 (Py I), и мышьяковистого пирита-2 (Py II), б – метазернистые выделения галенита (Gn) по трещинам в пирите-1; в, г – фото анилифов: в – метакристалл арсенопирита (Apy) на контакте кварцевого прожилка (Q) и метасоматита; г – пирит-1 с микропрожилками и метазернами сфалерита (Sph) с коррозионными границами
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Пирит является главным сульфидным минералом, наблюдается в зернах размером 0,02–5 мм и представлен двумя генерациями (рис. 2, а). Пирит-1 наблюдается в виде вкрапленности в березитизированных диорит-порфиритах, кварцевых метасоматитах. Ранний пирит часто катаклазирован, пересекается кварцевыми прожилками, содержит тонкие просечки и метазерна сфалерита, галенита с коррозионными границами. Пирит-2 также образует метазерна и метакристаллы в метасоматитах, но для него характерны более белая окраска в отраженном свете, аллотриоморфные срастания с зернами жильного

кварца, сфалеритом и самородным золотом. По данным микрозондового анализа главным отличием пирита-2 от пирита-1 является повышенное содержание As до 10 мас. %.

Арсенопирит отличается ромбовидными сечениями кристаллов (рис. 2, в), длинно призматическими формами, яркой белой окраской и анизотропией в отраженном свете. Размер кристаллов 0,05–1,5 мм. Характерна приуроченность арсенопирита к зонам кварцевого прожилкования. Срастания кубических кристаллов позднего пирита с ромбическими кристаллами арсенопирита указывает на их близко одновременное образование.

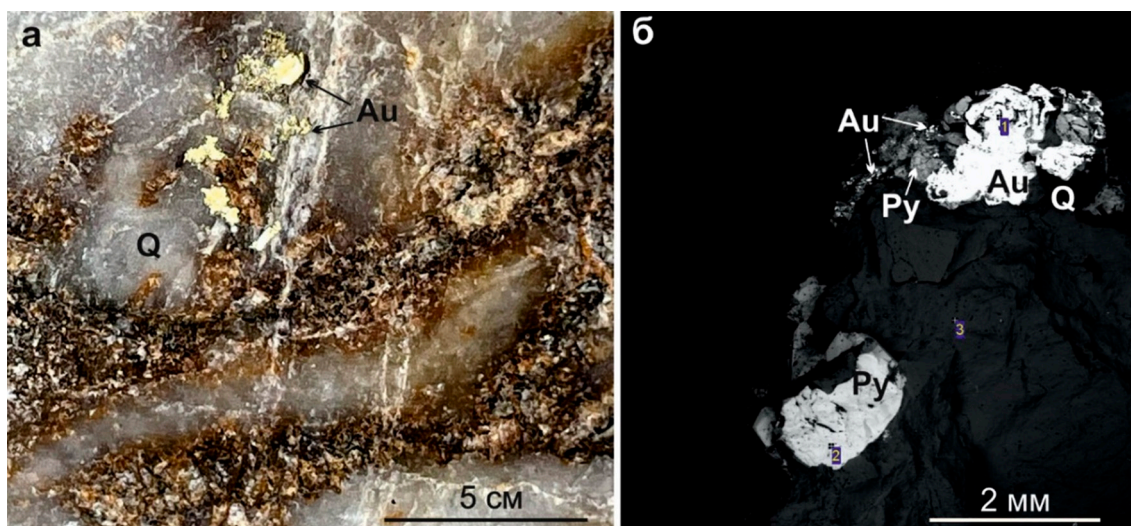


Рис. 3. Самородное золото (Au) с кварцем (Q) и пиритом (Py) в главном рудном теле месторождения Шахтное: а – фото фрагмента образца кварцевой жилы с вкрапленностью золота; б – микрофотография выделений золота в сростании с мышьяковистым пиритом в отраженных электронах
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Сфалерит наблюдался в виде мелких единичных зерен (размером 0,0002–0,5 мм) совместно с пиритом-2, а также в прожилках кварца. Является более поздним по отношению к пириту-1, так как пересекает его в виде прерывистых микропрожилков и метазерен с коррозионными заливообразными границами (рис. 2, г).

Галенит – по количеству, размеру выделений и морфологическим особенностям аналогичен сфалериту. Метазерна галенита (размером от 20–50 мкм до 0,01 мм) с коррозионными границами приурочены к микротрещинам в пирите-1 (рис. 2, б).

Халькопирит и блеклые руды являются редкими минералами, встречаются в виде единичных мелких зерен (менее 0,1–0,5 мм) в кварцевых прожилках. Минералы, представленные сульфидами меди, часто образуют сростания с самородным золотом.

Золото наблюдалось в свободном состоянии в виде зерен (0,01–20 мм) и гнездообразных скоплений до 5 см в поперечнике (рис. 3, а). Видимое золото локализовано преимущественно в кварцевых жилах и прожилках, которые образуют штокверки в метасоматически измененных дайковых телах. Отмечались сростания золота с мышьяковистым пиритом второй генерации (рис. 3, б), халькопиритом, галенитом, блеклыми рудами. Пробность золота по данным микрозондового анализа – 887–881, примесь серебра – в среднем 11,5 %.

Тонкодисперсное золото в мышьяковистом пирите-2 и арсенопирите было об-

наружено при проведении анализа рудных минералов методом LA-ISP-MS.

На рис. 4, а, показано, что в катаклазированном пирите первой генерации (с кварцевыми прожилками по трещинам) основными элементами являются Fe и S. Арсенопирит (рис. 4, б) отличается ярко выраженной линией As и примесью Au (0,235 ppm). Выдержанный характер линии золота во время абляции свидетельствует о том, что золото, вероятно, присутствует здесь в виде изоморфной примеси. В пирите-2 (рис. 4, в) отмечаются повышенные содержания As, а также золота (0,028 ppm) в виде неравномерно рассеянных микровключений.

Анализ полученных данных позволяет выделить две главные стадии постмагматического минералообразования: метасоматическую и рудную гидротермальную. Пирит-1 является ранним рудным минералом и, возможно, относится к предрудной метасоматической (березитовой) стадии. В гидротермальную стадию формировались минералы золоторудной парагенетической ассоциации: жильный кварц, золотоносный мышьяковистый пирит-2, золотоносный арсенопирит, самородное золото, галенит, сфалерит, халькопирит, блеклые руды. Невидимое золото в рудно-гидротермальном мышьяковистом пирите характерно для золото-кварцевых месторождений Колымского района [12, 13] и может быть обусловлено присутствием наноразмерных частиц золота [14].

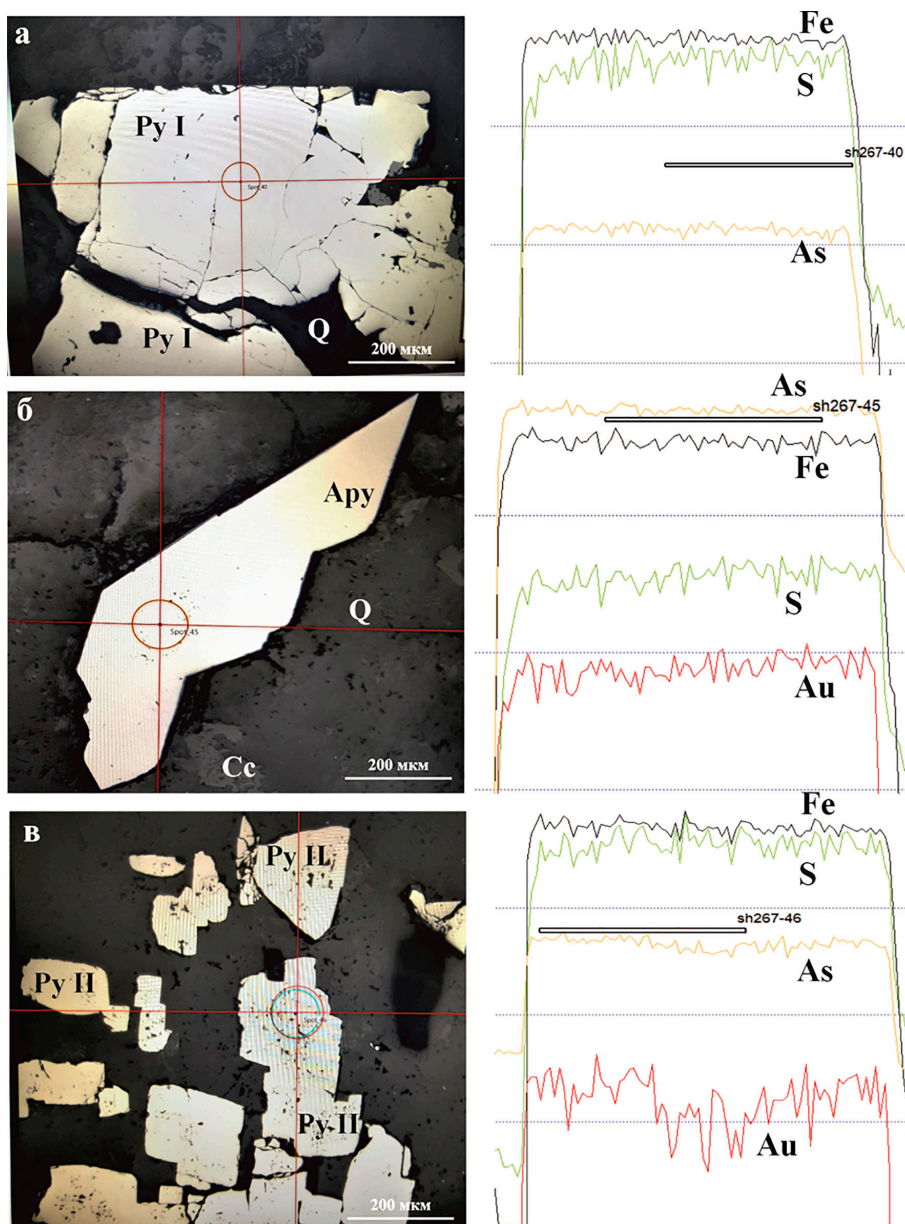


Рис. 4. Результаты исследований рудных минералов методом LA-ISP-MS:
 а – пирит-1 (Py I), катаклазированный с кварцевыми прожилками (Q);
 б – арсенопирит (Apy) с изоморфной примесью золота в кварцевом метасоматите (Q)
 с карбонатами (Cc), в – мышьяковистый пирит-2 (Py II) с тонкодисперсным золотом
 Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Проведенные исследования подтверждают, что руды месторождения Шахтное относятся к золото-кварцевой формации. Данный тип широко представлен на месторождениях региона и отличается хорошей извлекаемостью золота из руд: до 92–98 % [15].

Отчетливая связь Au с As характерна для малосульфидной золото-кварцевой формации, что является основанием для поисков золота по геохимическим аномалиям мышьяка. Однако в пределах Урьинского

рудного поля, при наличии аномалий As, часто не обнаруживают промышленных скоплений золота. Это свидетельствует о том, что наличие арсенопирита, в котором золото присутствует в виде изоморфной примеси, является благоприятным, но недостаточным признаком для поисков богатых руд. Изучение месторождения Шахтное показало, что рудные столбы в минерализованных дайках обязательно содержат видимое свободное золото в жильном кварце в ассоциации

с мышьяковистым пиритом второй генерации и разнообразными сульфидами. Поэтому более достоверными для геохимических поисков золотого оруденения на данной территории будут комплексные аномалии As-Cu-Pb-Zn.

Закключение

Месторождение Шахтное относится к дайковому типу и золото-кварцевой малосульфидной формации. Скопления золота и сульфидов в рудных столбах приурочены к кварцевым сетчато-прожилковым, паукообразно-прожилковым зонам в березитизированных дайках диорит-порфиритов.

Рудные минералы образуются в две постмагматические стадии: предрудную метасомагматическую (пирит первой генерации) и рудную гидротермальную (самородное золото, золотоносный мышьяковистый пирит второй генерации, золотоносный арсениопирит, сфалерит, галенит, халькопирит, блеклые руды). К поисковым признакам рудного золота необходимо относить комплексные геохимические аномалии As с Cu, Pb и Zn.

Полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования и поисков рудного золота в Урьинском рудном районе и на сопредельных территориях Центрально-Колымского региона.

Список литературы

1. Аристов В. В. Закономерности размещения золоторудных объектов Яно-Колымской провинции // Геология и геофизика. 2019. Т. 60. № 8. С. 1108–1125. DOI: 10.15372/GiG2019060.
2. Фридовский В. Ю., Горячев Н. А., Крымский Р. Ш., Кудрин М. В., Беляцкий Б. В., Сергеев С. А. Возраст золотого оруденения Яно-Колымского металлогенического пояса, Северо-Восток России: первые данные Re-Os изотопной геохронологии самородного золота // Тихоокеанская геология. 2021. Т. 40. № 4. С. 18–32. URL: http://itig.as.khb.ru/POG/2021/n_4/pdf/Fridovsky.pdf (дата обращения: 03.03.2026). DOI: 10.30911/0207-4028-2021-40-4-18-32.
3. Позднякова Н. Н., Ивасенко Р. Н., Роднов Ю. Н., Попов Ю. В. Типоморфизм самородного золота рудопроявлений Берентальского рудного поля, Магаданская область // Руды и металлы. 2019. № 3. С. 61–70. DOI: 10.24411/0869-5997-2019-10024.
4. Волков А. В., Черепанова Н. В., Прокофьев В. Ю., Савва Н. Е., Смилгин С. В., Трубкин Н. В., Алексеев В. Ю. Месторождение золота в гранитоидном штоке Бутарный (Северо-Восток России) // Геология рудных месторождений. 2013. Т. 55. № 3. С. 214–237. DOI: 10.7868/S0016777013030064.
5. Бондаренко Н. В., Утенков В. А., Панчерский Н. В., Раков Н. Д. Геолого-генетическая модель формирования Ветренского золоторудного месторождения (Магаданская область) // Отечественная геология. 2020. № 2. С. 17–31. DOI: 10.24411/0869-7175-2020-10008.
6. Хасанов И. М., Михалицына Т. И., Муравьев Л. А., Макарова Д. В. Использование методологии трансформации геофизических полей при изучении рудных систем дайкового типа в зоне влияния Чай-Юрьинского глубинного разлома // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова. Серия «Науки о Земле». 2024. № 2. С. 25–35. DOI: 10.25587/2587-8751-2024-2-25-35.
7. Хасанов И. М., Михалицына Т. И., Макарова Д. В. Геолого-геофизические критерии прогнозирования разноранговых золоторудных площадей в пределах Центрально-Колымского региона (на примере Чай-Юрьинского рудного узла Берелехского рудного района, Северо-Восток России) // Отечественная геология. 2025. № 6. С. 55–67. DOI: 10.47765/0869-7175-2025-10023.
8. Чепурнов И. А., Грановская Н. В. Особенности магматического контроля золотого оруденения Чай-Урьинского месторождения (Магаданская область) // Новое в познании процессов рудообразования: материалы Четырнадцатой Российской молодежной научно-практической Школы (г. Москва, 17–21 ноября 2025 г.). М.: Издательство Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, 2025. С. 230–234. EDN: VINHOW.
9. Горячев Н. А. Дайки и золотое оруденение: генетическая или парагенетическая ассоциация? // Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН. 2005. № 1. С. 36–43. EDN: KNWXKB.
10. Волков А. В., Егоров В. Н., Прокофьев В. Ю., Сидоров А. А., Горячев Н. А., Бирюков А. А. Месторождение золота в дайках Яно-Колымского пояса // Геология рудных месторождений. 2008. Т. 50. № 4. С. 311–337. EDN: JJRLBR.
11. Михалицына Т. И., Фомина М. И. Петрографический и минералогический составы пород и руд Урьинского рудного поля (Берелехский рудный район, Северо-Восток России) // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова. Серия «Науки о Земле». 2025. № 1. С. 23–42. DOI: 10.25587/2587-8751-2025-1-23-42.
12. Соцкая О. Т., Семьшев Ф. И., Малиновский М. А., Альшевский А. В., Ливач А. Э., Горячев Н. А. Пирит зон сульфидизации терригенных комплексов Яно-Колымского орогенного пояса (Северо-Восток России): генерации, типохимизм, минеральные ассоциации // Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН. 2022. № 1. С. 14–30. URL: http://vestnik.north-east.ru/2022/n1/ft_Sotskaya.pdf (дата обращения: 04.03.2026). DOI: 10.34078/1814-0998-2022-1-14-30.
13. Сидорова Н. В., Аристов В. В., Григорьева А. В., Сидоров А. А. «Невидимое» золото в пирите и арсениопирите месторождения Павлик (Северо-Восток России) // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2020. Т. 495. № 1. С. 26–31. DOI: 10.31857/S2686739720110134.
14. Меретуков М. А. Природные частицы нанозолота в мышьяковистом пирите // Цветные металлы. 2011. № 3. С. 4–7. URL: <https://www.rudmet.ru/journal/480/article/4543/> (дата обращения: 03.03.2026). EDN: NFAQDH.
15. Нигай Е. В. Рудные формации и минералого-геохимические особенности месторождений благородных металлов Дальневосточного региона России // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. № 6. С. 245–255. EDN: LACFPL.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

УДК 551.24:553:546.74
DOI 10.17513/use.38504



CC BY 4.0

**МЕСТОРОЖДЕНИЯ НИКЕЛЯ: РАСПРОСТРАНЕНИЕ,
ЗАПАСЫ И ПРОБЛЕМЫ ОСВОЕНИЯ**

Ларионова Т. И. ORCID ID 0009-0000-2582-7707, Бородина Д. С.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения
Российской академии наук, Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация,
e-mail: sirius70@mail.ru*

Статья посвящена комплексному анализу проблем глобальных никелевых ресурсов. Целью исследования является изучение вопросов, связанных с определением основных проблем поиска, разработки и освоения месторождений никеля. Для достижения цели собраны, изучены и систематизированы актуальные данные порядка 28 опубликованных источников. Применен метод анализа вторичных данных. Проведенными исследованиями подтверждено, что в настоящее время ресурсная база никелевого сырья значительно истощена. В этой связи уделено внимание проблемам освоения ресурсов никеля, которые определяют современную динамику многих отраслей промышленности. Рассмотрена целесообразность поиска новых и расширения разрабатываемых никеленосных территорий за счет планирования поисково-оценочных работ на флангах и глубоких горизонтах известных рудных узлов. Получен вывод о необходимости технологических инноваций для поиска и освоения нетрадиционных типов руд, таких как месторождения техногенного генезиса, продукты ударных процессов, а также черносланцевые толщи. Показано, что способы извлечения полезных компонентов из руд требуют всесторонней модернизации, что обусловлено, в частности, пагубным влиянием на окружающую среду. Для снижения отрицательного воздействия на экологию процессов извлечения полезных компонентов из рудного материала рекомендовано внедрять в производство новые усовершенствованные экологически безопасные, эффективные и экономически рентабельные, малоотходные технологии. Результаты проведенных исследований показали, что на современном этапе основной задачей поиска и освоения месторождений никеля является усовершенствование способов проводимых работ перечисленных направлений.

Ключевые слова: месторождения никеля, поиски и добыча полезных ископаемых, рудные тела

**NICKEL DEPOSITS: DISTRIBUTION,
RESERVES, AND DEVELOPMENT PROBLEMS**

Larionova T. I. ORCID ID 0009-0000-2582-7707, Borodina D. S.

*Federal State Budgetary Institution of Science Research Geotechnological Center
of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation, e-mail: sirius70@mail.ru*

The article is devoted to a comprehensive analysis of the problems of global nickel resources. The purpose of the study is to examine the issues related to identifying the main problems of searching for, developing, and exploiting nickel deposits. To achieve this goal, relevant data from about 28 published sources have been collected, studied, and systematized. The method of secondary data analysis has been applied. The conducted research has confirmed that the resource base of nickel raw materials is currently significantly depleted. In this regard, attention has been paid to the problems of exploiting nickel resources, which determine the current dynamics of many industries. The expediency of searching for new and expanding the developed nickel-bearing territories by planning prospecting and evaluation works on the flanks and deep horizons of known ore nodes is considered. The conclusion is obtained on the need for technological innovations for searching and development of non-traditional types of ores such as deposits of technogenic genesis, products of impact processes, as well as black shale strata. It is shown that the methods of extracting useful components from ores require comprehensive modernization, which is due, in particular, to the harmful impact on the environment. To reduce the negative impact on the environment of the processes of extracting useful components from ore material, it is recommended to introduce new improved environmentally friendly, efficient and cost-effective, low-waste technologies into production. The results of the conducted research have shown that at the current stage, the main task of searching and developing nickel deposits is to improve the methods of the work carried out in the listed areas.

Keywords: nickel deposits, exploration, mining, ore bodies

Введение

Никель давно перешел в категорию материалов стратегического и повседневного значения. На современном уровне развитие таких отраслей, как «зеленая» энергетика

(аккумуляторы), аэрокосмическая и оборонная промышленность, медицина, химическое машиностроение и инфраструктурное строительство, немислимо без его использования. Стабильное обеспечение этим важным ре-

сурсом сопряжено с комплексом взаимосвязанных проблем, пронизывающих всю цепочку – от этапов геологоразведочных работ до промышленного освоения недр.

Поиск новых месторождений никеля сталкивается с растущими объективными трудностями. Наиболее богатые и доступные для открытия объекты в значительной степени уже выявлены и истощены. Развитие сырьевой базы смещается в сторону вовлечения более бедных по содержанию, но крупных по запасам источников никеля, что требует адаптации и разработки новых поисковых моделей и технологий. Серьезные вызовы возникают и на стадии разработки уже разведанных месторождений. Один из таких вызовов обусловлен тем, что технологии добычи и переработки руд, как правило, сопряжены с рисками загрязнения окружающей среды, притом что экологические требования сегодня являются одним из ключевых ограничивающих факторов.

Таким образом, современная проблематика, связанная с месторождениями никеля, представляет собой сложный узел, в котором переплетаются геологические, технологические, экономические и экологические факторы. Эффективное развитие никелевой промышленности невозможно без системного анализа проблем и поиска инновационных решений на каждом этапе – от прогнозирования и поиска новых ресурсов до их экологически сбалансированной и экономически целесообразной добычи. В этой связи рассмотрение вопросов, связанных с выделением и решением указанных проблем, имеет особую актуальность. Данная статья посвящена детальному рассмотрению указанных аспектов с целью структурирования ключевых вызовов и направлений для их преодоления.

Цель исследования – раскрытие и освещение вопросов, связанных с определением основных проблем поиска и разработки источников никеля, а также с предложением рекомендаций для решения выявленных проблем.

Материалы и методы исследования

В статье приводятся результаты сбора, изучения и анализа материалов предыдущих исследователей, связанных с проблемами поиска и разработки источников никеля. Работа с опубликованными (вторичными) данными представляет собой целостный исследовательский процесс, построенный на критическом мышлении, технических навыках извлечения и обработки данных,

владении статистическими методами анализа и строгом соблюдении принципов исследовательской этики. Применение этих методов позволило извлекать обоснованные выводы, экономя время и ресурсы на самостоятельный сбор первичной информации.

Результаты проведенных исследований позволили систематизировать полученные данные по определенным критериям. Это позволило выйти на более высокий уровень владения информацией и дальнейшего получения выводов и рекомендаций. Полученная в результате проведенных исследований информация может быть использована для оптимизации и решения задач расширения минерально-сырьевой базы для никелевой промышленности.

В качестве объекта исследования в настоящей работе выбраны месторождения никеля. Основным материалом для анализа состояния запасов никелевого сырья и характеристики месторождений послужили статьи и другие материалы, опубликованные в разные годы. Исследование проводилось в течение 2024–2025 гг. Всего было проанализировано порядка 28 источников. Исследования проводились путем системного подхода с использованием различных методов анализа информации.

Результаты исследования и их обсуждение

Никель начал использоваться людьми с древних времен. Так, китайцы еще в III в. до н. э. производили и экспортировали сплавы никеля. Как отдельный химический элемент никель был открыт в 1751 г. шведским ученым-химиком Акселем Кронстедтом. Одни из первых рудопроявлений никеля были обнаружены в Канаде (район Садбери) в 1853–1856 гг. [1; 2].

Основные генетические типы месторождений никеля

Никель относится к группе сидерофильных и литофильных элементов, что предопределяет два главных типа его промышленных месторождений: сульфидные медно-никелевые (магматические) и силикатные (коры выветривания). Выделяются также месторождения гидротермального и контактово-карстового типа, имеющие подчиненное значение в связи с низкой распространенностью и содержаниями полезного компонента.

Магматические месторождения

Магматические месторождения никеля обеспечивают основную долю добычи ме-

талла в мире благодаря крупным масштабам рудных тел и возможности отработки открытым способом. Россия (Норильский рудный район), Канада (рудный пояс Садбери) и Австралия являются лидерами по запасам данного типа. Изучение условий магматического рудогенеза имеет ключевое значение для прогнозирования и поисков новых слепых рудных тел на глубине. Магматические месторождения никеля генетически связаны с процессами дифференциации базит-ультрабазитовой магмы. Их образование происходит на стадии кристаллизации магматического расплава, обогащенного магнием и железом. Исходная магма, поднимаясь по глубинным разломам из мантийных источников (обычно деплетированной мантии или плюмов), содержит растворенные сульфиды и силикаты [3].

Ключевым процессом рудообразования является ликвация – разделение первично гомогенного силикатного расплава на две несмешивающиеся жидкости: силикатную (породообразующую) и сульфидную (рудную). Это происходит вследствие изменения термодинамических параметров (падение давления, температуры) и ассимиляции корового материала, который повышает содержание серы в системе [4; 5, с. 371].

Тяжелая сульфидная жидкость, представленная преимущественно пирротинном, пентландитом и халькопиритом, под действием гравитации опускается в придонные части магматической камеры. Накопление рудного вещества происходит обычно в придонных частях интрузивных тел, а также в зоне эндоконтакта.

Главными рудными минералами магматического типа месторождений являются пентландит ((Fe,Ni)₉S₈), пирротин (Fe₇S₈), халькопирит (CuFeS₂). По текстуре руды делятся на вкрапленные (сингенетические), сульфиды равномерно распределены в силикатной матрице (оливин, пироксен); массивные (нодулярные и брекчиевые), сплошные сульфидные скопления, залегающие, как правило, в подошве интрузивов.

В рамках магматического типа выделяют две главные подгруппы:

1. Ликвационные месторождения в расчлененных интрузивах. Приурочены к крупным стратиформным массивам (Норильск в России, Бушвельд в ЮАР). Отличаются огромными запасами и комплексным составом руд (Ni, Cu, Co, МПГ, Au).

2. Месторождения зеленокаменных поясов (коматитовые). Связаны с архейскими ультраосновными вулканитами – комати-

итами. Примером служит месторождение Камбалда в Австралии. Эти руды, как правило, более богаты никелем, но объемы залежей меньше.

Месторождения коры выветривания

Месторождения кор выветривания (латеритные месторождения) никеля формируются в условиях влажного тропического климата. В процессе химического разложения серпентинитов и перидотитов подвижные элементы выносятся, а никель накапливается в остаточных минералах. В экзогенных условиях при выщелачивании серпентинитов и оливина при избытке CO₂ происходит переход никеля в раствор бикарбоната Ni(HCO₃)₂. В результате дальнейшей миграции никеля в виде раствора в благоприятных для образования водных силикатов условиях происходит его осаждение. Накопление никеля в пределах кор выветривания происходит, как правило, в нижних горизонтах [5, с. 379]. Основные рудные тела залегают в двух горизонтах: охристо-кремнистых латеритах и зоне гидросиликатов. Рудные тела месторождений кор выветривания имеют обычно плащеобразную, площадную или линейную форму. Среди рудных минералов наибольшую ценность представляет гарниерит и нонтронит, концентрирующие металл в легкообогащаемой форме. Крупнейшие провинции расположены в Новой Каледонии, Индонезии и на Кубе, где коры выветривания достигают мощности 50 м.

Плутоногенные гидротермальные месторождения

На месторождениях данного типа рудные тела прослеживаются на десятки – первые сотни метров как по простиранию, так и по падению, при среднем значении мощности 0,4–0,5 м. Главными рудными минералами являются никелин, смальтин, скуттерудит, саффлорит. Плутоногенные гидротермальные месторождения никеля различаются по составу руд и условиям образования. При низких и средних температурах формируются жильные месторождения никель-кобальтовых арсенидов с серебром и висмутом. При гидротермальных процессах повышенные концентрации никеля в виде арсенидов и сульфидов образуются в парагенезисе с кобальтом, мышьяком, серой, иногда и висмутом, ураном и серебром. Месторождения плутоногенного гидротермального типа не представляют практического интереса в связи с низкими запасами и содержанием полезного компонента. В России к месторождениям этого типа относят место-

рождение Ховуаксы в Туве. За рубежом – месторождения в Марокко (Бу-Аззер), Канаде (Эльдорадо, Кобальт), Германии (Рудные горы), Финляндии и Киргизии.

Месторождения контактово-карстового типа

Контактово-карстовые месторождения образуются на контакте магматических и карбонатных пород. Воды тысячелетиями выщелачивают карстовые полости, создавая природные ловушки. Рудные тела характеризуются сложной формой. Залежи имеют форму гнезд или карманов. Химический состав залежей отличается высокой изменчивостью по простиранию. Добыча залежей данного генетического типа осложнена нестабильностью и обводненностью карстов. В нашей стране к месторождениям этой группы относится Уфалейское месторождение. Уфалейское месторождение приурочено к тектоническому контакту известняков и серпентинитов [5, с. 123, 348].

Факторы, влияющие на формирование месторождений никеля

Формирование генетических типов месторождений никеля контролируется геологическими, физико-химическими и климатическими факторами, которые создают условия для образования значительных рудных скоплений.

1. Магматический фактор (для сульфидного типа)

Образование сульфидных медно-никелевых месторождений неразрывно связано с внутриплитным магматизмом крупных провинций. Ключевым фактором является внедрение высокомагнезиальных расплавов (пикритов, коматиитов) или базальтовой магмы в земную кору. Решающую роль играет процесс ликвации: при падении температуры и давления исходный силикатный расплав разделяется на две несмешиваемые жидкости – силикатную и сульфидную [6, с. 5]. В сульфидной фракции, в связи с большей ее плотностью, происходит концентрация никеля, меди и элементов платиновой группы. Однако для промышленной концентрации необходим фактор ассимиляции серы. Внедряющаяся магма должна проплавить и усвоить серосодержащие породы (сульфаты или пирит вмещающих толщ), чтобы повысить содержание серы в системе. Без дополнительного источника серы сульфиды выделяются в малом объеме и рассеиваются, не формируя рудных тел. Форма рудных тел зависит от структурного фактора. В камерах расслоенных интрузи-

вов тяжелая сульфидная жидкость скапливается в придонных частях магматических камер (силлах, лополитах) [7]. Напротив, в условиях субвулканических или жерловых фаций формируются жильные и брекчиевые руды, где сульфиды цементируют обломки вмещающих пород.

2. Факторы гипергенного концентрирования (для силикатного типа)

Силикатные (никелевые) месторождения образуются в корях выветривания ультраосновных пород (перидотитов, дунитов, серпентинитов). Здесь ведущими факторами выступают климатический и тектонический. Процесс требует влажного тропического или субтропического климата, обеспечивающего интенсивное химическое выветривание. В условиях плоского рельефа и стабильного тектонического режима происходит разложение первичных минералов (оливина, серпентина). Никель, высвобождающийся при разрушении кристаллической решетки, в кислой среде верхних горизонтов мигрирует в нижние горизонты коры выветривания. В зоне застойного водного режима, где среда становится щелочной, никель осаждается, замещая магний в гидросиликатах (гарниерите, нептуите). Важнейшим фактором является наличие длительного перерыва в осадконакоплении и тектонической стабильности – для формирования зрелого латеритного профиля требуются миллионы лет без эрозии. Промышленная ценность месторождений сульфидного и силикатного типов часто усиливается гипергенными процессами. Мощность зоны выщелачивания и зоны накопления латеритов контролируется уровнем грунтовых вод. В сульфидных месторождениях зона окисления приводит к выносу серы и обогащению верхних горизонтов вторичными силикатами никеля.

Среди факторов, влияющих на формирование месторождений никеля, выделяются также геологические эпохи и стадии геодинамического развития.

3. Геологические эпохи как факторы образования месторождений никеля

Докембрийская эпоха выступает ключевым фактором рудообразования благодаря двум аспектам: специфическому геохимизму мантии того времени (повышенная никеленосность) и развитию тектонических режимов, способствовавших становлению крупных ультраосновных тел. Именно в этот период сформировались основные промышленно значимые типы сульфидных медно-никелевых месторождений, что об-

условлено спецификой тектоники плит, тепловым режимом и составом мантии в архее и раннем протерозое [6, с. 6]. Главенствующая роль в этом процессе принадлежит докембрийским зеленокаменным поясам и областям развития расслоенных интрузий. Классическими примерами месторождений, сформированными в докембрийскую эпоху, являются месторождения Камбалда (Австралия) и пояса Абитибиды (Канада), а также интрузивы Бушвельдского комплекса (ЮАР) и Великая Дайка (Зимбабве), где никеленосность ассоциирована с базальными горизонтами ультраосновной фации [5, с. 354].

В позднепалеозойскую эпоху формировались месторождения гидротермального генезиса, среди которых можно отметить кобальт-никелевые месторождения (Ховуаксы, Тува). На Урале в позднем палеозое формирование месторождений никеля происходило в корах выветривания ультраосновных пород (Еловское, Устейское и др.). Месторождений никеля с промышленными содержаниями ценных компонентов, сформированными в данную эпоху, не найдено.

В мезозойскую эпоху благодаря активным проявлениям магматизма и рифтогенеза возникли термодинамические и физико-химические условия, необходимые для отделения, транспортировки и концентрирования сульфидного никелевого оруднения в промышленных масштабах. В раннемезозойский этап произошло внедрение основной массы сибирских траппов на рубеже перми и триаса, тектоно-магматическая активизация привела к образованию крупнейших сульфидных медно-никелевых месторождений Норильского рудного района (Сибирская платформа). В это же время произошло формирование месторождений в ЮАР (Восточный Грикваленд) [5, с. 354].

В мезозое продолжается формирование никеленосных кор выветривания на Южном Урале (Еловское, Устейское и др.). Распространение силикатных никелевых руд отмечается и в других регионах (Казахстан, Бразилия и др.).

Главным фактором кайнозойского никелевого рудогенеза явилась экзогенная переработка древних ультраосновных массивов. Это привело к формированию богатых силикатных (окисленных) руд, приуроченных к корам выветривания мезозойско-кайнозойского возраста (Урал, Куба, Новая Каледония, Индонезия), что делает кайнозой значимым этапом в образовании значительной части мировых запасов никеля нетрадиционного для более древних эпох. В резуль-

тате мезозойско-кайнозойской тектоники широко проявился процесс формирования латеритного типа выветривания ультраосновных пород (перидотитов, дунитов, серпентинитов) обнажившихся на континентах. Оптимальные условия для этого сложились в гумидном и семигумидном тропическом и субтропическом климате палеогена и неогена. Это привело к формированию богатых силикатных (окисленных) руд, приуроченных к корам выветривания мезозойско-кайнозойского возраста (Урал, Куба, Новая Каледония, Индонезия) [6, с. 9].

4. Геодинамический фактор

Формирование промышленно значимых скоплений никеля является закономерным результатом эволюции литосферы в специфических геодинамических обстановках, которые определяют источник рудного вещества, механизмы его транспортировки и физико-химические условия концентрации. Наблюдается зависимость формирования месторождений никеля от геодинамического режима территории. Основные мировые запасы никеля (сульфидный тип) генетически связаны с внутривулканическим магматизмом зон растяжения, а именно с процессом рифтогенеза и мантийным плюмовым магматизмом [5, с. 123]. Классическим примером служат крупные изверженные провинции, где в условиях континентального рифтогенеза происходило внедрение высокомагнезиальных расплавов (коматитов, пикритов) [6, с. 9; 7].

Вторым важнейшим геодинамическим фактором является формирование кор выветривания [5, с. 143]. Данный процесс реализуется в условиях платформенного (кратонного) режима с длительным континентальным перерывом в осадконакоплении. Тектоническая стабильность и выровненный рельеф в условиях гумидного или тропического климата способствуют глубокой химической дезинтеграции ультраосновных пород (офиолитовых комплексов), обнажающихся в складчатых поясах, завершивших свое развитие. В гипергенных условиях происходит мобилизация никеля, его перетолжение и концентрирование в коре выветривания с образованием силикатных (гарниерит-нонтронитовых) руд. Формирование подобных месторождений, широко распространенных на Урале, в Новой Каледонии и на Кубе, является прямым следствием денудации рельефа в постинверсионную стадию развития региона. Таким образом, геодинамический режим выступает не просто фоном, а главным энергетическим и ве-

ществленным фактором, определяющим тип, масштаб и промышленную ценность месторождений никеля.

Таким образом, формирование месторождений никеля – это результат совпадения мантийного источника, благоприятной геодинамической обстановки для ликвации или выветривания, а также специфических термодинамических условий в земной коре.

Распространение, запасы и использование никелевых руд

В связи с широким использованием никеля в различных сферах (в производстве нержавеющей стали и специальных сплавов, в химической промышленности, энергетике и электронике и др.), определяется значимость никеленосных руд для мирового баланса. В 2022 г. мировое производство никеля в товарных рудах и концентратах составило около 3,3 млн т, наибольший рост показателя отмечен в Индонезии (на 54 %) и России (на 12 %) [8]. Мировые запасы никеля на сегодняшний день составляют около 162 млн т, среди которых на долю силикатных никелевых руд приходится 60 % подтвержденных запасов [9; 10]. В России сосредоточено около 15 % мировых запасов. При этом 90 % российских запасов медно-никелевых руд относится к сульфидному типу, который связан с дифференцированными массивами основных и ультраосновных пород. Остальные 10 % находятся в рудах силикатных месторождений коры выветривания ультраосновных массивов [8]. По разведанным запасам месторождения никеля подразделяются на уникальные (более 1 млн т), весьма крупные (от 500 тыс. до 1 млн т), крупные (от 250 тыс. до 500 тыс. т), средние (от 100 тыс. до 250 тыс. т) и мелкие (менее 100 тыс. т).

Месторождения Курило-Камчатского региона

К одной из новых территорий, на которых производится разработка и поиски медно-никелевых руд на Дальнем Востоке России, относится Камчатская никеленосная провинция [11]. Месторождения и проявления Камчатской металлогенической провинции приурочены к Камчатскому срединному массиву. Промышленные медно-никелевые оруденения месторождений Камчатской никеленосной провинции, как правило, связано синтрузия микортландит-горнблендит-пироксенит-габбро-диоритовой ассоциации дукусского комплекса [12; 13]. Руды Камчатской никеленосной провинции, в отличие от руд Норильского рудного района,

содержат меньше меди [12]. Месторождения Камчатской никеленосной провинции по содержанию полезных компонентов относятся к классу средних и мелких с богатыми рудами сплошного, гнездово-прожилкового и вкрапленного характера при содержании никеля 5,49 %. Главными рудными минералами являются пирротин, пентландит и халькопирит. Прогнозные ресурсы никеля Камчатской никеленосной провинции составляют более 1 млн т [12; 13].

Месторождения Сибири

Формирование промышленно значимых месторождений сульфидных медно-никелевых руд на Сибирской платформе генетически связано с процессами траппового магматизма на границе перми и триаса [5, с. 202]. Рудные тела приурочены к дифференцированным интрузиям основного состава, пространственно тяготеющим к зонам глубинных разломов. Главным районом добычи является Норильский рудный узел, где в пределах Хараелахского и Норильско-Марковского интрузивов локализованы уникальные по запасам залежи. Промышленная ценность определяется высокими содержаниями никеля, меди, кобальта и металлов платиновой группы в вкрапленных и массивных рудах. Руды сложены пирротином (52 %), халькопиритом (28 %), пентландитом (20 %) и минералами группы платины. На востоке региона, в зоне сочленения Сибирской платформы и складчатого обрамления, известны более мелкие объекты, связанные с ультраосновным магматизмом. Руды этих месторождений, как правило, характеризуются более низким качеством и сложным минералогическим составом.

Месторождения Кольского полуострова

Никелевые месторождения Кольского полуострова входят в состав Печенгско-Имандра-Варзугской зоны. Печенгско-Имандра-Варзугская зона протягивается в северо-западном направлении и захватывает территорию Финляндии и Норвегии. В пределах Кольского полуострова расположен Мончегорский рудный район, в котором находится Мончегорское месторождение. Медно-никелевое оруденение Мончегорского месторождения относится к ликвационно-магматическому типу. Основную массу рудного вещества составляют ликвационные сульфиды. Ликвационные сульфиды при зарождении магмы находятся в растворенном состоянии. При кристаллизации магмы происходит выделение ликвационных сульфидов [3]. В северо-западной части Кольского полуострова расположен

Печенгский рудный район. Медно-никелевые месторождения Печенгского рудного района имеют магматический генезис и связаны с измененными ультрабазитовыми телами. Интрузивные массивы с рудоносной минерализацией имеют пластообразную или линзовидную форму. Медно-никелевые руды Печенгского рудного района представлены вкрапленными, сплошными, брекчиевидными и прожилково-вкрапленными морфологическими типами. В большинстве случаев руды приурочены к нижним частям ультраосновных массивов и к подстилающим их породам. Главными сульфидными минералами являются пирротин, пентландит и халькопирит [5, с. 308].

Месторождения Белоруссии

Вопрос наличия промышленных месторождений цветных металлов на территории Белоруссии долгое время оставался открытым в силу глубокого залегания кристаллического фундамента (от 100 до 5000 м под осадочным чехлом). На территории Белоруссии выявлены два основных генетических типа никелевого оруденения: сульфидный медно-никелевый (связанный с магматическими породами основного-ультраосновного состава) и силикатный (коры выветривания) [2]. Основные перспективы никеленосности связываются с двумя типами геологических образований: ультрабазит-базитовыми комплексами фундамента и корами выветривания. Ельский рудный узел (Микашевичско-Житковичский выступ) является одним из наиболее изученных в отношении никеленосности. Здесь в ходе глубокого бурения в 1970–1980-х гг. были вскрыты интрузии основного и ультраосновного состава (перидотиты, пироксениты, габброиды).

В пределах Центрально-Белорусской зоны смятия (Минская область) известен Бобовнянский массив габброидов. Здесь также фиксируются геохимические аномалии никеля. Тип минерализации: Преимущественно силикатный никель (связанный с минералами группы серпентина и хлорита).

Наиболее богатым источником никеля в Белоруссии считаются древние коры выветривания мезозойского возраста (элювий), развитые по ультраосновным породам в Полесье. По условиям образования белорусские коры выветривания напоминают разрабатываемые месторождения силикатного никеля на Украине (Побужский рудный район) и Среднем Урале.

Ресурсный потенциал никеля в Белоруссии остается недостаточно изученным.

Перспективы его промышленного освоения связаны не с открытием богатых сульфидных руд классического типа, а с выявлением крупнообъемных месторождений с низким содержанием металла в корях выветривания при условии разработки эффективных технологий обогащения.

Несмотря на наличие утвержденных запасов, месторождения никеля в Белоруссии в настоящее время не разрабатываются. Это обусловлено комплексом факторов:

1. Технологическая сложность извлечения никеля из руды.

2. Сложные горнотехнические условия залегания рудных тел.

3. Экономическая конъюнктура: при текущем уровне мировых цен на никель себестоимость производства белорусского металла будет выше средней рыночной.

Таким образом, месторождения никеля в Белоруссии представляют собой реальный минерально-сырьевой потенциал. В случае изменения экономических условий (дефицит металла на рынке, развитие «зеленой» энергетики, требующей больших объемов никеля) или появления инновационных технологий переработки эти объекты могут быть вовлечены в промышленное освоение [2].

Месторождения Канады

Медно-никелевые месторождения, расположенные на территории Канады, имеют в основном магматический генезис. Месторождения этой генетической группы связаны с магматическими телами пироксенит-перидотитовой формации [14, с. 15]. Имеется также гипотеза импактного происхождения месторождений этой группы. Месторождения этой группы приурочивают также к астроблеме, возникшей на месте падения крупного метеорита в протерозойское время [15; 5, с. 370]. Общие запасы месторождения составляют 360 млн т руды при среднем содержании никеля 1,5 % [8].

Магматический комплекс Стиллуотер

Магматический комплекс Стиллуотер расположен в северо-западной части территории США и относится к габбро-норит-пироксенит-перидотитовой формации. Массив имеет расслоенное строение. С массивом связан ряд крупных рудопроявлений и месторождений меди, никеля, хрома и платины [8].

Бушвельдский комплекс месторождений Африки

Никелевые месторождения Бушвельдского комплекса, расположенного в южной части Африканской платформы приурочены к расслоенной серии пород основного и ультраосновного состава (габбро-норит-пи-

роксенит-перидотитовая формация). В вертикальном разрезе интрузива наблюдаются все типы магматических разновидностей мафит-мезомафического состава. Бушвельдский рудный интрузив имеет лаполитообразную форму [5, с. 259]. Медно-никелевые сульфидные руды имеют вкрапленный характер. Главными рудными минералами являются пентландит, пирротин и виоларит. Наиболее крупным месторождением Бушвельдского комплекса является месторождение Nkomati. Добыча ведется как открытым, так подземным способом. Основная зона минерализации месторождения Nkomati представлена сплошным сульфидным рудным телом с относительно высоким содержанием никеля. Среднее содержание никеля в руде составляет 0,37 %. Доказанные и вероятные запасы месторождения Nkomati составляют 980 тыс. т [8].

Месторождения Западной Австралии

По запасам никеля Австралия занимает одно из первых мест в мире, они составляют 17,7 млн т [8; 14, с. 45]. Разработка месторождений никеля в Австралии началась еще в конце 1960-х гг. Месторождения разрабатывались подземным способом. Здесь было обнаружено более 30 месторождений, образующих Западно-Австралийскую никеленосную провинцию. Никеленосность Западно-Австралийского региона в большинстве случаев связана с вулканическими коматитами, а также с интрузивными дунитами и расслоенными габброидами. Приуроченность оруденения к интрузивным дунитам и расслоенным габброидам позволила объединить месторождения Западно-Австралийского региона в Западно-Австралийский тип, наиболее близкий по ряду генетических и структурных параметров к Норильскому типу [16–18]. Одной из наиболее характерных особенностей данного типа является резкая вещественная рудная зональность. Внутренняя расслоенность сульфидных руд связывается с распадом моносльфидных твердых растворов. Рудные залежи в большинстве случаев развиты в основании толщ серпентинизированных оливиновых перидотитов, представляющих нижние кумулятивные части ультрамафических коматитов. Рудные тела большинства месторождений Западно-Австралийской никеленосной провинции имеют форму линз и прослоев, согласных общему напластованию пород коматит-толеитовой формации. Иногда рудные тела имеют столбообразную форму. Содержание никеля в рудах составляет от 0,6 до 9,5 % при среднем значении 2,1 % [8].

Прогнозирование месторождений никеля

Для проведения прогноза месторождений никеля необходимо изучение и установление закономерностей связи рудных формаций и месторождений [19, с. 7; 20; 4]. В зависимости от решаемых задач прогнозирование подразделяется на локальное и региональное. Локальное и региональное прогнозирование базируется на комплексном анализе геологических, геофизических и геохимических данных [21].

Основной задачей регионального прогнозирования является выделение новых перспективных территорий. В его задачу также входит определение перспектив площадей, находящихся в составе известных продуктивных районов.

Основной задачей локального прогнозирования на наличие полезных ископаемых перспективных территорий в пределах уже известных территорий и действующих предприятий является выявление рудоконтролирующих структур и фаций. Локальное прогнозирование осуществляется в пределах, выделенных и установленных руденосных регионов и в районах действующих предприятий никелевой промышленности. Увеличить количество этих факторов позволяет повышение объема изученного материала. Кроме того, одной из главных задач геологоразведочных работ является также проведение планомерных поисковых работ на перспективных площадях.

Необходимо отметить, что на разрабатываемых месторождениях никеля отмечается тенденция к снижению запасов массивных руд с высоким содержанием полезного компонента. Снижение запасов богатых руд заставляет разрабатывать и проводить внедрение новых методических исследований. Такие исследования должны способствовать поиску новых месторождений и источников получения полезного компонента. Одним из таких направлений является применение гидрохимического метода поиска полезных ископаемых и в частности никеля [12; 4].

Новые источники получения никеля

Постоянный рост рынка потребления никеля требует поиска новых никеленосных провинций и месторождений. Рост цен на никелевое сырье заставляет осваивать территории, считавшиеся ранее нерентабельными, а также проводить планирование поисково-оценочных работ на флангах и глубоких горизонтах уже известных рудных зон и узлов [3]. Очевидно, что даже Но-

рильский комбинат может оказаться на грани разорения, если руководство не будет заниматься модернизацией технологий переработки руд и поиском новых рудных тел на уже освоенных территориях [5, с. 431].

Одним из новых рудных источников получения никелевого сырья являются импактные кратеры (астроблемы). Наиболее ярким примером такой импактно-магматической минерализации является месторождение Садбери (Канада). Долгое время генезис этого уникального медно-никелевого месторождения вызывал споры. Современные петрологические и изотопные исследования подтверждают, что его образование инициировано падением крупного астероида около 1,85 млрд лет назад. Следовательно, метеоритные процессы следует рассматривать не как основной поставщик никеля, а как важный геологический агент, способный в исключительных случаях модифицировать рудоносные системы и создавать аномально богатые скопления руды. На территории России к таким объектам можно отнести Попигайскую структуру [5, с. 370].

Черносланцевые толщи и глубоководные конкреции, также можно рассматривать в качестве источников никеля. Содержание никеля в них может достигать 70 г/т [22].

К новому направлению получения никеля в последние годы стали относить переработку техногенных отходов месторождений. Структура техногенного месторождения включает комплекс продуктов горно-обогажительного (отвалы, хвостохранилища) и металлургического (шлаки) производства [23]. Переработка техногенных отходов месторождений может стать одним из ключевых источников по решению проблемы истощения богатых запасов [24].

Проблемы поиска и разработки месторождений никеля

Поиски и разработка месторождений никеля являются стратегически важными направлениями для мировой промышленности, обеспечивая сырьем такие ключевые секторы, как металлургия, машиностроение, электротехника и производство аккумуляторов. Однако на современном этапе отрасль сталкивается с комплексом взаимосвязанных проблем на всех стадиях – от поиска до эксплуатации.

Основные проблемы поиска заключаются в истощении и ухудшении качества легкодоступных ресурсов. Крупные и богатые месторождения сульфидного типа в традиционных горнорудных районах в значитель-

ной степени выработаны. Это заставляет планировать геологоразведочные работы в сложных, часто труднодоступных регионах и на объектах с более низким содержанием полезного компонента. В случае латеритных месторождений, составляющих около 60 % мировых ресурсов, поиск осложняется их значительной площадью распространения и необходимостью оценки не только никеля, но и попутных компонентов (кобальт, редкоземельные элементы) для обеспечения экономической целесообразности. Современный поиск требует применения дорогостоящих высокотехнологичных методов (геофизика, дистанционное зондирование и др.) и комплексного моделирования, что увеличивает временные и финансовые затраты.

Ключевые проблемы разработки носят технико-технологический, экономический и экологический характер.

1. Технологические сложности. Переработка бедных и сложных по составу руд, особенно латеритов, требует больших энергозатрат и применения специфических, часто индивидуально разрабатываемых гидрометаллургических или пирометаллургических схем. Сульфидные месторождения уходят на большие глубины, что повышает риски ведения горных работ и затраты на инфраструктуру.

2. Экологический аспект. Добыча и переработка никельсодержащих руд связаны с образованием больших объемов отходов (вскрышные породы, хвосты обогащения, шлаки). Существует риск загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами, кислыми стоками и пылевыми выбросами. Особенно остро эта проблема стоит при разработке латеритов в странах с уязвимыми экосистемами. Это ведет к ужесточению природоохранного законодательства и росту затрат предприятий на внедрение наилучших доступных технологий и рекультивацию.

3. Экономические факторы. Проекты становятся все более капиталоемкими при длительных сроках окупаемости. Их рентабельность зависит от конъюнктуры мировых цен на никель, которая подвержена значительным колебаниям. Нестабильность цен создает риски для инвестиций в новые масштабные проекты.

Исследователями установлено, что извлечение цветных и благородных металлов, в том числе и никеля, из ультрамафических пород традиционными методами неэкономично [2]. Также этот процесс оказывает па-

губное влияние на окружающую среду [25]. В связи с этим необходимо проводить разработку и внедрение в производство новых методик извлечения полезных компонентов из рудного материала, использование которых позволяет сохранить геоэкологический баланс природных территорий, например таких, как бактериально-химическое выщелачивание [26–28].

Заключение

Изучение вопросов, связанных с поисками и разработкой месторождений никеля, вызвано необходимостью расширения минерально-сырьевой базы никелевой промышленности. Анализ, обобщение и систематизация опубликованных данных позволили выделить основные проблемы поиска и разработки источников никеля, получить выводы и дать рекомендации для решения установленных проблем.

Проведенными исследованиями подтверждено, что на разрабатываемых месторождениях никеля отмечается тенденция к снижению запасов богатых (массивных) и увеличению бедных (вкрапленных) руд, а также общему истощению минерально-сырьевой базы никеля. В этой связи рассмотрена целесообразность расширения разрабатываемых и освоения новых никеленосных территорий. При этом рекомендовано вовлечение в разработку нетрадиционных видов источников никелевого сырья, таких как импактные структуры, черносланцевые залежи, глубоководные конкреции, техногенные отходы месторождений никеля.

Исследования также показали, что добыча и переработка никельсодержащих руд связаны с рисками загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами, кислыми стоками, пылевыми выбросами и другими вредными отходами производства. Для снижения отрицательного воздействия на окружающую среду процессов извлечения полезных компонентов из рудного материала рекомендовано внедрение новых модернизированных методик и технологий переработки минерального сырья, которые разрабатываются учеными (бактериально-химическое выщелачивание и др.).

Таким образом результаты проведенных исследований, показали, что на современном этапе развития никелевой промышленности основной задачей поиска, освоения и эксплуатации источников никеля является разработка и применение новых низкотратных и экологичных методик в перечисленных направлениях.

Список литературы

1. Земсков В. В., Прасолов В. И. Истощение минеральных ресурсов как угроза экономической безопасности России // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2021. Т. 11. № 10. С. 195–205. DOI: 10.34670/AR.2021.76.61.023. EDN: KVHANA.
2. Десяткин А. С., Гайсина Л. Г. Современные тенденции и проблемы освоения медно-порфировых месторождений Российской Федерации // Экологический вестник России. 2018. № 4. С. 38–42. EDN: YVIZJM.
3. Криволуцкая Н. А. Геохимические исследования пород Сибирской магматической провинции и их роль в теории образования уникальных платино-медно-никелевых месторождений // Записки Горного института. 2024. Т. 269. С. 738–756. EDN: ROAVGE.
4. Гроховская Т. Л., Бакаев Г. Ф., Шолохнев В. В., Лапина М. И., Муравицкая Г. Н., Войтехович В. С. Рудная платино-металлическая минерализация в расслоенном Мончегорском магматическом комплексе (Кольский полуостров, Россия) // Геология рудных месторождений. 2003. Т. 45. № 4. С. 329–352. EDN: OTUUIID.
5. Лихачев А. П. Платино-медно-никелевые месторождения / А. П. Лихачев. М.: Эслан, 2006. 495 с. EDN: QKFZVW. ISBN 5-94101-155-5.
6. Быховер Н. А. Распределение мировых ресурсов минерального сырья по эпохам рудообразования. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1984. 576 с.
7. Семячков А. И., Балащенко В. В. Оценка экономических и экологических условий для эффективного освоения силикатных никелевых руд месторождений Среднего Урала // Экономика региона. 2024. Т. 20. № 1. С. 205–217. DOI: 10.17059/ekon.reg.2024-1-14. EDN: EXFAFM.
8. Игревская Л. В. Особенности развития мировой никелевой промышленности на современном этапе // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2006. № 1. С. 96–99. EDN: KHRNWF.
9. Лялюк Е. С., Горячев А. А., Компанченко А. А. Извлечение цветных металлов из сульфидных руд с помощью биовыщелачивания на примере Аллареченского техногенного месторождения // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. 2023. Т. 26. № 2. С. 150–159. DOI: 10.21443/1560-9278-2023-26-2-150-159. EDN: VHNCYL.
10. Московкин Д. В. Анализ состояния минерально-сырьевой базы мировой никелевой промышленности // Записки Горного института. 2002. Т. 150. № 2. С. 155–158. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-sostoyaniya-mineralno-syrievoy-bazy-mirovoy-nikelevoy-promyshlennosti> (дата обращения: 15.02.2026).
11. Кунгурова В. Е. Краткий обзор минерально-сырьевого потенциала Камчатской никеленосной провинции (основные этапы изучения, состояние и перспективы освоения) // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 10. С. 31–56. DOI: 10.25018/0236-1493-2022-12-10-31. EDN: XASDFI.
12. Паламарь С. В. Гидрохимические методы поисков месторождений никеля на Камчатке // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № S57. С. 142–147. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-12-57-142-147. EDN: YUBKTI.
13. Трухин Ю. П., Степанов В. А., Сидоров М. Д. Камчатская никеленосная провинция // Доклады Академии наук. 2008. Т. 418. № 6. С. 802–805. EDN: ICEAHD.
14. Туганова Е. В. Формационные типы, генезис и закономерности размещения сульфидных платиноидно-медно-никелевых месторождений (на примере Восточно-Сибирской и некоторых других провинций). СПб.: ВСЕГЕИ, 2000. 100 с.
15. Latypov R., Chistyakova S., Grieve R., Huhma H. Evidence for igneous differentiation in Sudbury Igneous Complex and impact-driven evolution of terrestrial planet proto-crusts // Nature Communications. 2019. Vol. 10. Is. 1. URL: <https://www.nature.com/articles/s41467-019-08467-9> (дата обращения: 14.02.2026). DOI: 10.1038/s41467-019-08467-9. EDN: CREXTW.

16. Крылов И. О., Никулин И. И. Новые данные об условиях локализации и составе сульфидных медно-никелевых руд западной части Октябрьского месторождения Норильского района // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2023. № 3. С. 98–112. DOI: 10.55959/MSU0579-9406-4-2023-63-3-98-112.
17. Заскинд Е. С., Конкина О. М. Типизация сульфидных медно-никелевых и платинометалльных месторождений для целей прогноза и поисков // Отечественная геология. 2019. № 2. С. 3–15. DOI: 10.24411/0869-7175-2019-10010.
18. Chayka I. F., Kamenetsky V. S., Zhitova L. M. et al. Hybrid Nature of the Platinum Group Element Chromite-Rich Rocks of the Norilsk 1 Intrusion: Genetic Constraints from Cr Spinel and Spinel-Hosted Multiphase Inclusions // Economic Geology. 2020. Vol. 115. Is. 6. P. 1321–1342. DOI: 10.5382/ econgeo.4745. EDN: KEILXJ.
19. Радько В. А. Фации интрузивного и эффузивного магматизма Норильского района. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2016. 226 с. ISBN 978-5-93761-243-4.
20. Спиридонов Э. М. Норильские рудоносные интрузивы и сульфидные руды. К 120-летию М. Н. Годлевского // Отечественная геология. 2022. № 6. С. 95–116. DOI: 10.47765/0869-7175-2022-10038. EDN: UZAZWC.
21. Малич К. Н. Критерии прогноза сульфидных платиноидно-медно-никелевых месторождений Норильской провинции // Литосфера. 2021. № 21 (5). С. 660–682. DOI: 10.24930/1681-9004-2021-21-5-660-682.
22. Батурин Г. Н. Геохимия микроэлементов в углеродистых осадках современных морей и океанов // Геохимия. 2017. № 5. С. 402–412. DOI: 10.7868/S0016752517050041. EDN: YTKRIB.
23. Гурская Л. И., Снежко О. Н., Молчанов А. В., Васильев С. П. Техногенные месторождения платиновых металлов – новый источник ценного промышленного сырья // Региональная геология и металлогения. 2016. № 66. С. 80–90. EDN: WEIOVP.
24. Василькова А. О., Васильков Н. В., Хмельницкая О. Д., Войлошников Г. И. Анализ современного состояния способов переработки техногенного золотосодержащего сырья // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2021. Т. 25. № 1. С. 97–107. DOI: 10.21285/1814-3520-2021-1-97-107.
25. Александрова Т. Н., Афанасова А. В., Кузнецов В. В., Абурова В. А. Выбор параметров флотации сульфидных медно-никелевых руд на основе анализа распределения компонентов по флотиремости // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 1. С. 131–147. DOI: 10.25018/0236-1493-2022-1-0-131.
26. Трухин Ю. П., Хайнасова Т. С., Рогатых С. В. Выделение хемолитотрофных микроорганизмов из окисленной руды медно-никелевого месторождения Шануч (Камчатка) для биовыщелачивания сульфидных руд // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2012. № 1. С. 86–91. URL: <https://www.vydelenie-hemolitotrofnih-mikroorganizmov-iz-okislennoy-rudy-medno-nikelevogo-mestorozhdeniya-shanuch-kamchatka-dlya-biovyschelachivaniya-sulfidnyh-rud.pdf> (дата обращения: 14.02.2026).
27. Александрова Т. Н., О'Коннор С. Переработка платинометалльных руд в России и Южной Африке: состояние и перспективы // Записки Горного института. 2020. Т. 244. С. 462–473. DOI: 10.31897/PMI.2020.4.9.
28. Гаврилов А. С., Ординарцев Д. П., Крашенинин А. Г., Петрова С. А. Извлечение никеля и кобальта из продукционных растворов кучного выщелачивания окисленных никелевых руд // Разведка и охрана недр 2022. № 8. С. 63–68. DOI: 10.53085/0034-026X_2022_08_63.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

СТАТЬЯ

УДК 556:626.81:627.8
DOI 10.17513/use.38505



CC BY 4.0

**РЕЗУЛЬТАТЫ ОБСЛЕДОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО
СОСТОЯНИЯ ДЕГРАДИРОВАВШИХ БЕСХОЗНЫХ
ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ
САРАКТАШСКОГО РАЙОНА ОРЕНБУРГСКОЙ ОБЛАСТИ**

**Качаев А. Е. ORCID ID 0000-0001-6840-2477,
Лесников И. Р. ORCID ID 0009-0002-1111-8883,
Турапин С. С. ORCID ID 0009-0000-1198-2511**

*Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Всероссийский научно-исследовательский институт систем орошения
и сельхозводоснабжения „Радуга“», Радужный, Российская Федерация,
e-mail: doctor_cement@mail.ru*

Проблема бесхозных гидротехнических сооружений остаётся актуальной для Российской Федерации из-за отсутствия собственника и надлежащего технического обслуживания, что увеличивает риски для населения и окружающей среды. В условиях изменения климата и роста паводковой опасности оперативная оценка фактического состояния таких объектов имеет практическое значение. Целью настоящего исследования явилось определение фактического технического состояния нескольких бесхозных прудов Саракташского района Оренбургской области для дальнейшего обоснования решений о последующей эксплуатации, консервации или ликвидации на основании визуального обследования и ретроспективного анализа деградации объектов. Проведено в полевых условиях визуальное обследование указанных прудов, выполнена фотофиксация, сопоставлены проектные данные с фактическим состоянием по результатам инженерных изысканий, проанализирована муниципальная документация и спутниковые снимки предыдущих лет. Выявлено, что на объектах наблюдается критическая деградация конструктивных элементов: просадки гребней плотин, образование сквозных проранов и эрозионных оврагов в водосбросах, коррозия водовыпусков, зарастание древесно-кустарниковой растительностью и отсутствие эксплуатационного ухода. Установлено, что сооружения утратили мелиоративные функции, превратившись в деградированные элементы рельефа; восстановление работоспособности признано экономически нецелесообразным для ряда объектов. Установлено, что обследованные объекты не представляют для окружающей среды и населения угрозы ввиду того, что утратили эксплуатационные функции. Рекомендована их официальная ликвидация, а также продолжение аналогичных обследований по району на аналогичных объектах для выработки управленческих решений.

Ключевые слова: гидротехнические сооружения, бесхозные объекты, состояние, плотина, Оренбургская область, обследование, проран

**RESULTS OF SURVEY OF THE TECHNICAL CONDITION
OF DEGRADED ORPHANAGED HYDRAULIC STRUCTURES
IN THE SARAKTASH DISTRICT OF THE ORENBURG REGION**

**Kachaev A. E. ORCID ID 0000-0001-6840-2477,
Lesnikov I. R. ORCID ID 0009-0002-1111-8883,
Turapin S. S. ORCID ID 0009-0000-1198-2511**

*Federal State Budgetary Scientific Institution “All-Russian Research Institute
of Irrigation and Agricultural Water Supply Systems “Raduga” Raduzhny,
Russian Federation, e-mail: doctor_cement@mail.ru*

The problem of abandoned hydraulic structures remains pressing in the Russian Federation due to the lack of ownership and proper maintenance, which increases the risks to the population and the environment. In the face of climate change and increasing flood risk, a prompt assessment of the actual condition of such structures is of practical importance. The aim of this study was to determine the actual technical condition of several abandoned ponds in the Saraktash District of the Orenburg Region to further substantiate decisions on subsequent operation, conservation, or liquidation based on a visual inspection and a retrospective analysis of the structure's degradation. A visual field inspection of the ponds was conducted, photographs were taken, design data was compared with the actual condition based on engineering survey results, and municipal documentation and satellite imagery from previous years were analyzed. Critical degradation of structural elements was identified at the facilities, including dam crest subsidence, the formation of through-holes and erosion gullies in spillways, corrosion of water outlets, overgrowth by trees and shrubs, and a lack of operational maintenance. It was determined that the structures had lost their reclamation functions, becoming degraded landforms; restoration of their functionality was deemed economically impractical for a number of facilities. It was determined that the surveyed facilities pose no threat to the environment or the population due to their loss of operational functionality. Their official closure was recommended, as was the continuation of similar surveys at similar facilities throughout the region to inform management decisions.

Keywords: hydraulic structures, abandoned objects, condition, dam, Orenburg region, survey, ditch

Введение

Проблема бесхозных гидротехнических сооружений (ГТС) является актуальной для Российской Федерации и сопряжена с серьезными рисками для населения и окружающей среды [1]. Отсутствие собственника или эксплуатирующей организации означает отсутствие должного контроля, технического обслуживания и проведения необходимых мероприятий по обеспечению безопасности подобного рода гидротехнических сооружений. ГТС, особенно те, что отработали установленный срок службы (например, IV класс – 50 лет), требуют постоянного мониторинга и оценки своего технического состояния. Аварийные ситуации на этих объектах могут привести к катастрофам с разрушительными последствиями, включая затопление обширных территорий и человеческие жертвы [2-4].

Законодательство РФ (в частности, ст. 225 ГК РФ и Федеральный закон № 117-ФЗ «О безопасности ГТС») обязывает муниципальные образования выявлять и ставить на учет такие объекты для дальнейшего принятия решений об их эксплуатации, консервации или ликвидации [5]. В этом контексте исследование состояния бесхозных ГТС в конкретных регионах имеет высокую практическую значимость.

Актуальность исследования, помимо всего прочего, обусловлена тем, что отсутствие надлежащего мониторинга и технического обслуживания сооружений подобного рода ведет к неконтролируемой деградации конструктивных элементов ГТС. Как отмечают современные исследователи [6; 7], аварии на малых бесхозных ГТС, несмотря на их малый объем, способны вызывать каскадный эффект разрушений в периоды экстремальных паводков, что особенно критично для паводкоопасных регионов, таких как Оренбургская область [5; 8]. В условиях изменения климата и увеличения частоты аномальных осадков оценка фактического состояния таких объектов становится фундаментом для разработки стратегий по предупреждению чрезвычайных ситуаций на бесхозных объектах гидротехнического назначения [9].

Нормативно-правовой вектор в России на протяжении последних лет направлен на минимизацию количества бесхозных объектов через их ликвидацию или постановку на баланс муниципальных образований [10-12]. Однако принятие управленче-

ских решений невозможно без детального натурального обследования, позволяющего дифференцировать потенциально опасные сооружения от объектов, фактически прекративших свое существование как инженерные системы. В данном исследовании представлен анализ состояния пяти гидротехнических объектов Саракташского района Оренбургской области, результаты которого позволяют оценить масштаб деградации мелиоративного фонда региона.

Цель исследования – определение фактического технического состояния 5 бесхозных гидротехнических сооружений (прудов), расположенных на территории Саракташского района Оренбургской области, для принятия обоснованных решений о возможности их дальнейшей эксплуатации, консервации и (или) ликвидации на основании данных их визуального обследования и ретроспективы генезиса и эволюции их деградиционных процессов.

Материалы и методы исследования

Обследование и анализ 5 бесхозных ГТС Саракташского района выявил критическое разрушение сооружений, характеризующееся проранами, коррозией водовыпусков и превращением чаш прудов в овраги. Визуальное обследование 5 объектов – №№4, 13, 14, 19, 20 – проводилось в 2025 году.

В работе использовались методы анализа предоставленной муниципалитетом Саракташского района Оренбургской области исходной документации на обследуемые объекты, включая научно-техническое обследование 2020 года (изучение данных ФГУП НИИ «Водгео» от 2020-2021 года) и схему расположения водохозяйственных объектов района; фотофиксации существующего положения сооружений и прилегающих к ним территорий (акваторий); сравнительной оценки при сопоставлении проектных параметров с фактическим состоянием объектов (по результатам инженерных изысканий); визуальной оценки состояния водоотводящих и водоприемных сооружений [13].

Результаты исследования и их обсуждение

Натурные обследования гидротехнических сооружений в Саракташском районе выявили критическую деградацию конструктивных элементов, включая просадки гребней земляных плотин, масштабные эрозионные размывы – прораны – и полное отсутствие эксплуатационного ухода.

Сводные характеристики технического состояния обследуемых объектов

№ пруда	Населенный пункт/год постройки	Состояние гребня/откосов	Состояние водосброса (ВСС)	Наличие воды (УВ)	Оценка состояния	Статус
4	п. Советский, 1930 (рис. 1, 2)	Просадка гребня, промоины	Аварийное. Аварийный канал размыт (эродирован)	Ниже подошвы плотины, ток воды не наблюдается	Следы разрозненной фильтрации	Аварийное
13	с. Николаевка, 1970	Сквозной проран 6 м	Демонтирован/смыт	Отсутствует	Устойчивость потеряна	Разрушено
14	с. Старый Сокулак, 1990	Сквозной проран 4 м	Разрушен	Отсутствует	Напорный фронт нарушен	Разрушено
19	с. Новый Сокулак, 1988	Просадка гребня, зарос кустарником	Задернован	Лужи	Прочность не обеспечена	Аварийное
20	с. Новый Сокулак, 1988	Просадка гребня, следы перелива	Труба Ø500 мм проржавела	Мертвый объем	Нерабочее	Аварийное

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



Рис. 1. Ретроспективные снимки объекта № 4: А – 2021 г.; Б – 2025 г.
Примечание: составлено авторами при ретроспективном анализе



Рис. 2. Фотофиксация объекта № 4 по видам рис. 1: А – вид 1; Б – вид 2; В – вид 3
Примечание: составлено авторами при визуальном обследовании объекта

Анализ объектов 1970-1990-х годов постройки показал, что из-за многолетней фильтрации, коррозии металлических водовыпусков и зарастания древесно-кустарниковой растительностью сооружения утратили свои мелиоративные функции. Объекты фактически превратились в деградировавшие элементы рельефа с пересохшими чашами и разрушенными водопропускными системами, требующие глубокой реконструкции [14; 15] или ликвидации.

Результаты обследования объектов №№ 4, 13, 14, 19, 20 представлены в таблице.

На рисунках 1 и 2 показано ретроспективное изменение объекта № 4 с визуаль-

ными данными о его реальном техническом состоянии.

В качестве заключения по обследованному объекту № 4 можно сделать вывод: наблюдается деградация гидротехнического сооружения мелиоративного пруда – земляная плотина подверглась просадке, а аварийный водосброс эродирован до состояния оврага. Данные повреждения препятствуют достижению проектного уровня воды. При этом по результатам обследования можно также заключить, что ГТС объекта № 4 не соответствует критериям для классификации его как гидротехнического сооружения.

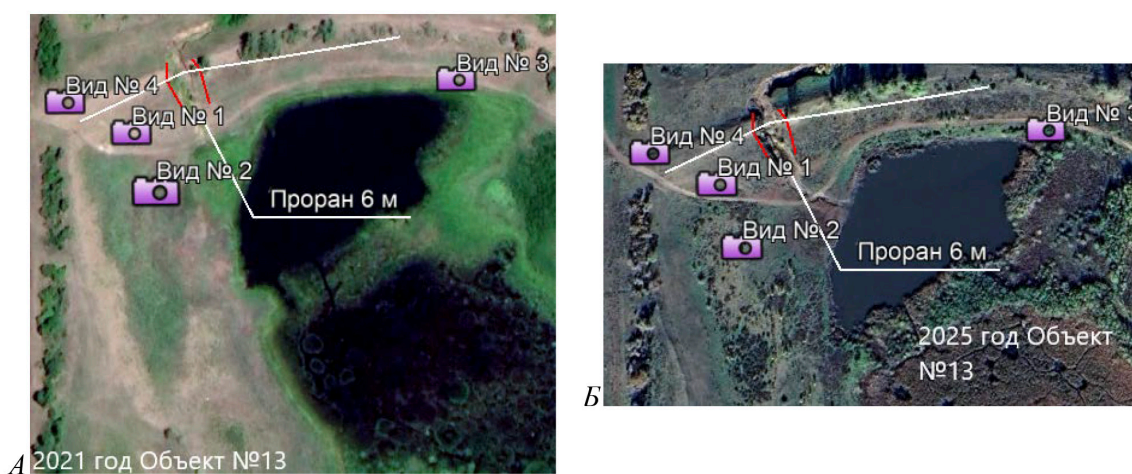


Рис. 3. Ретроспективные снимки объекта № 13: А – 2021 г.; Б – 2025 г.
Примечание: составлено авторами при ретроспективном анализе

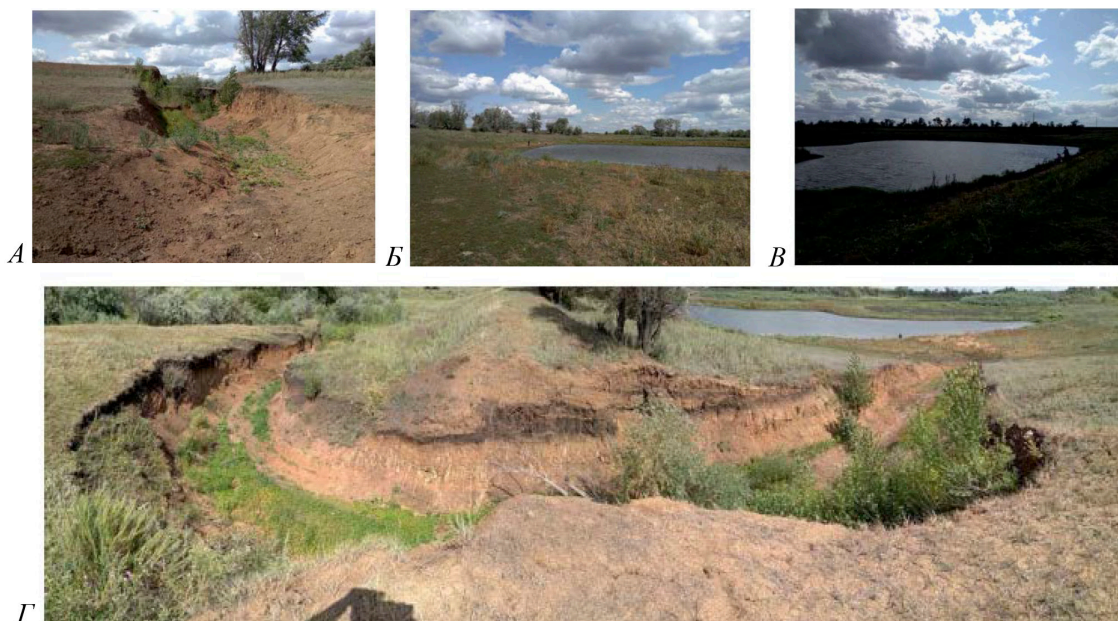


Рис. 4. Фотофиксация объекта № 13 по видам рис. 3: А – вид 1; Б – вид 2; В – вид 3; Г – вид 4
Примечание: составлено авторами при визуальном обследовании объекта

На пруду № 4, расположенном на безымянной балке п. Советский Саракташского района, не обнаружено никаких гидротехнических сооружений. Необходимость в проведении рекультивационных работ на данных землях отсутствует.

На рис. 3 и 4 показано ретроспективное изменение объекта № 13 с визуальными данными о его реальном техническом состоянии.

Земляная плотина, являющаяся гидротехническим сооружением пруда, разрушена и утратила свою функциональность. В связи

с этим данный объект № 13 не может быть классифицирован как гидротехническое сооружение. Гидротехнические сооружения пруда № 13, расположенного на реке Сух. Чебенька в 1 км к северо-западу от с. Николаевка Саракташского района, отсутствуют.

История изменений объекта № 14, прослеженная в ретроспективе, визуализирована на рис. 5. Что касается рис. 6, он содержит результаты фотофиксации, запечатлевшие реальные виды прилегающей к объекту территории.

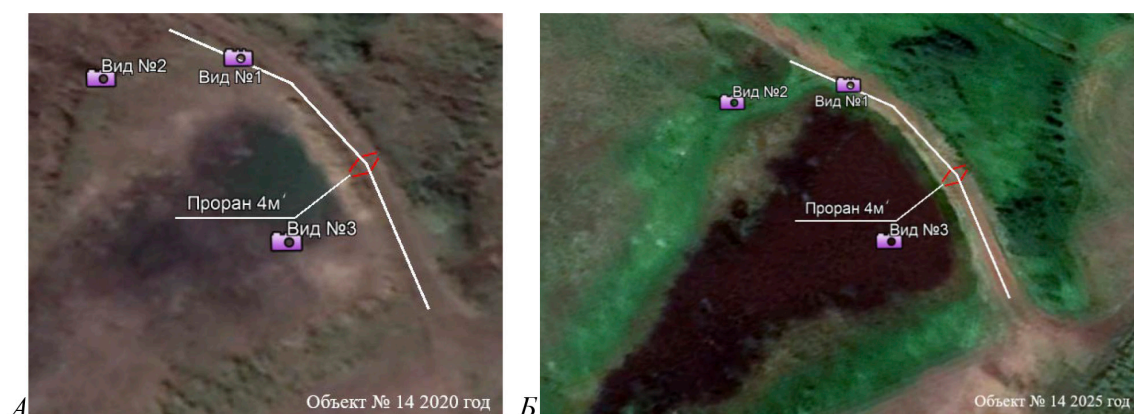


Рис. 5. Ретроспективные снимки объекта № 14: А – 2020 г.; Б – 2025 г.
Примечание: составлено авторами при ретроспективном анализе

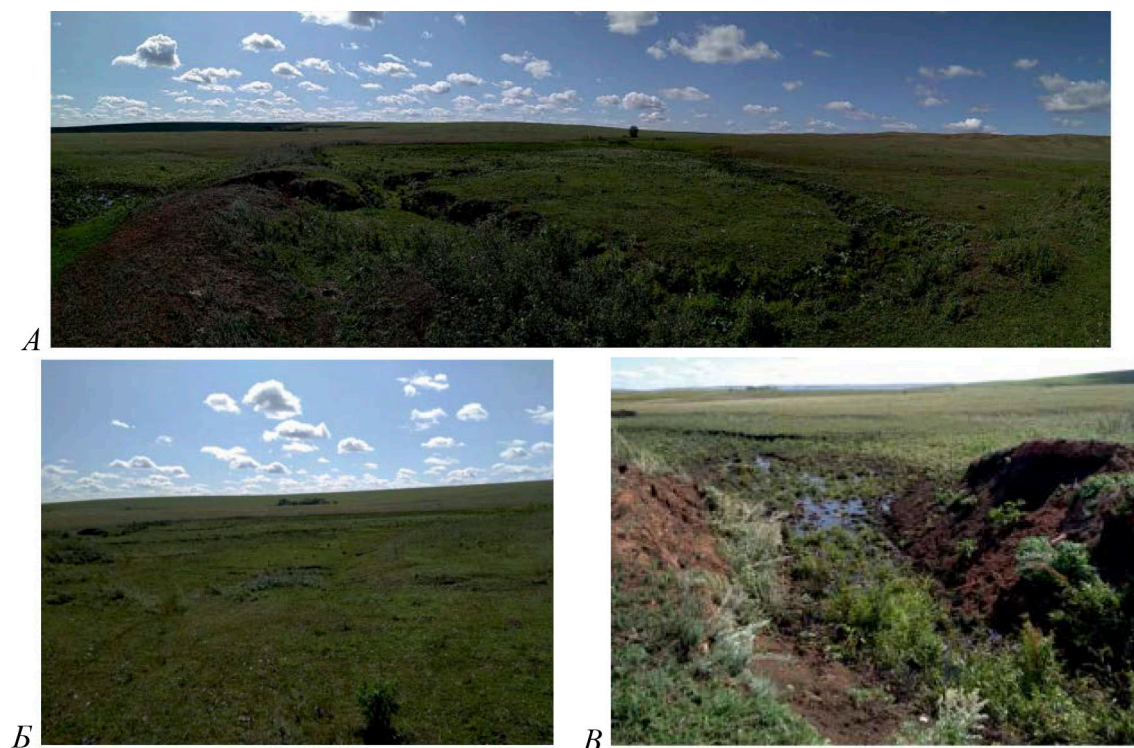


Рис. 6. Фотофиксация объекта № 14 по видам рис. 5: А – вид 1; Б – вид 2; В – вид 3
Примечание: составлено авторами при визуальном обследовании объекта



Рис. 7. Ретроспективные снимки объекта № 19: А – 2021 г.; Б – 2025 г.
Примечание: составлено авторами при ретроспективном анализе



Рис. 8. Фотофиксация объекта № 19 по видам рис. 5: А – вид 1; Б – вид 2; В – вид 3
Примечание: составлено авторами при визуальном обследовании объекта

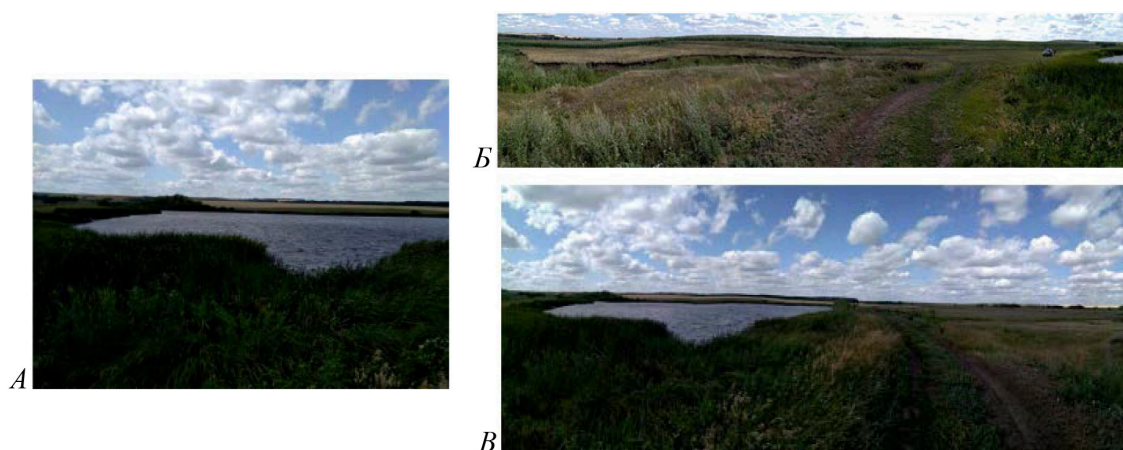


Рис. 9. Ретроспективные снимки объекта № 20: А – 2020 г.; Б – 2025 г.
Примечание: составлено авторами при ретроспективном анализе

В отношении гидротехнического сооружения пруда – земляной плотины – установлено, что она разрушена и не обеспечивает выполнение возложенных на нее ранее функций.

На рис. 7 и 8 показано ретроспективное изменение объекта № 19 с визуальными данными о его реальном техническом состоянии.



Рис. 10. Фотофиксация объекта № 20 по видам рис. 5: А – вид 1; Б – вид 2; В – вид 3
Примечание: составлено авторами при визуальном обследовании объекта

Гидротехнические элементы пруда № 19, а именно земляная плотина, подверглись деформации (проседанию), что привело к утрате их функциональности. Текущее состояние объекта не соответствует критериям, позволяющим классифицировать его как полноценное гидротехническое сооружение.

Изменение объекта № 20 в ретроспективе показано на рис. 9, а результаты фотофиксации характерных для сооружения и пруда видов представлены на рис. 10. Сооружения находятся в неработоспособном состоянии и не выполняют функции своего назначения. Состояние гидротехнических объектов пруда № 20 критическое: земляная плотина значительно просела, а водоотводной канал полностью разрушен, утратив свою функциональность. Фактически, эти элементы настолько деградировали, что уже не могут быть квалифицированы как действующие гидротехнические сооружения.

Пруд № 20 на реке Бурунча, который находится в 1 км юго-западнее села Новый Сокулук, не оборудован никакими гидротехническими сооружениями. Поэтому никаких работ по восстановлению прилегающих земель проводить не нужно.

Заключение

Визуальное обследование и анализ ретроспективных снимков объектов выявило неработоспособное состояние рассмотренных в этой части исследования объектов гидромелиоративного назначения, характеризующееся сквозными проравами шириной 4–6 метров (объекты №№ 13, 14), эрозивной трансформацией водосбросов в овраги

и полной коррозией металлоконструкций (объекты №№ 4, 20). Учитывая критическую деструкцию, разрушение фильтрационных экранов древесной растительностью и экономическую нецелесообразность восстановления объектов мелиоративных систем, рекомендуется официальная ликвидация обследованных объектов.

В процессе исследования для рассмотренных в этой части научной публикации объектов установлено, что плохое состояние объекта парадоксальным образом исключает возможность внезапной катастрофы, так как обследованные объекты уже фактически перестали существовать и утратили свою мелиоративную функцию накопителей.

Список литературы

1. Булгаков Д. В., Каштанов В. В., Медведева А. А. Анализ состояния и характеристика гидротехнических сооружений в Тоцком районе Оренбургской области // Наука и мир. 2025. № 6. С. 21–25. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_87234299_65550668.pdf (дата обращения: 27.02.2026).
2. Курбатов Н. П., Щербакова Д. М., Андрианова А. А., Епятьев А. Б. Мониторинг за состоянием малых гидротехнических сооружений // Наукосфера. 2024. № 11–2. С. 152–157. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_75253184_65439431.pdf (дата обращения: 27.02.2026).
3. Качаев А. Е., Турапин С. С. Методика численного моделирования устойчивости грунтовой плотины при экстренной сработке водохранилища // Экология и строительство. 2024. № 4. С. 4–13. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_80258861_70795266.pdf (дата обращения: 27.02.2026). DOI: 10.35688/2413-8452-2024-04-001.
4. Кадиев З. М., Кочетов А. Н. Правовое регулирование при реализации комплекса мер, направленных на обеспечение эксплуатационной надежности и безопасности бесхозяйных гидротехнических сооружений // Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. 2020. № 3 (82). С. 81–88. URL: <https://elibrary.ru/>

download/elibrary_44457099_96776559.pdf (дата обращения: 06.02.2026). DOI: 10.33580/2541-9684-2020-82-3-81-88.

5. Семякин Н. К. Земли гидротехнических сооружений: правовой режим по законодательству России // Аграрное и земельное право. 2020. № 11 (191). С. 47-49. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_46244408_27319619.pdf (дата обращения: 27.02.2026). DOI: 10.47643/1815-1329_2020_11_47.

6. Фазылов А. Р. Безопасность гидротехнических сооружений русловых водохранилищ // Водные ресурсы, энергетика и экология. 2024. Т. 4. № 3. С. 123-137. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_82274497_33017403.pdf (дата обращения: 27.02.2026).

7. Жезмер В. Б. Факторы, определяющие целесообразность эксплуатации гидротехнического сооружения // Природообустройство. 2022. № 3. С. 77-82. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_44166792_10352609.pdf (дата обращения: 27.02.2026). DOI: 10.26897/1997-6011-2022-3-77-82.

8. Овчарова А. Ю. Лобойко В. Ф., Лобойко А. В. Пруды Волгоградской области и их состояние // Нива Поволжья. 2020. № 2 (55). С. 77-83. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_44088430_87802102.pdf (дата обращения: 27.02.2026). DOI: 10.36461/NP.2020.2.55.013.

9. Новицкая Н. Н. Правовой режим мелиоративных систем и отдельно расположенных гидротехнических сооружений // Аграрное и земельное право. 2007. № 3 (27). С. 37-51. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_12884668_40277993.pdf (дата обращения: 27.02.2026).

10. Федоскин Н. Н. Проблемные вопросы вовлечения в оборот бесхозяйных земель населённых пунктов // Ориги-

нальные исследования. 2022. Т. 12. № 7. С. 113-116. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_49328854_45600869.pdf (дата обращения: 27.02.2026).

11. Качаев А. Е., Турапин С. С. Моделирование и верификация воздействия наводнения на железобетонную плотину // Наукосфера. 2025. № 5-2. С. 146-152. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_82542359_80979592.pdf (дата обращения: 06.02.2026). DOI: 10.5281/zenodo.15489160.

12. Плахина А. С. Механизмы эффективного управления органами местного самоуправления земельными ресурсами // Балтийский гуманитарный журнал. 2017. Т. 6. № 4 (21). С. 499-501. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_32239332_44278390.pdf (дата обращения: 27.02.2026).

13. Погодин Н. Н., Анженков А. С., Болбышко В. А. Эксплуатационный контроль технического состояния закрытой мелиоративной сети // Мелиорация. 2017. № 1 (79). С. 13-21. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_29450097_54447610.pdf (дата обращения: 27.02.2026).

14. Качаев А. Е. Учет деформаций грунтов насыпных плотин при консолидированных расчетах // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2025. № 48. С. 71-74. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_82560467_55820901.pdf (дата обращения: 06.02.2026). DOI: 10.26160/2474-5901-2025-48-71-74.

15. Качаев А. Е., Турапин С. С. Особенности реконструкции земляных плотин мелиоративных систем // Наука и мир. 2024. № 3. С. 6-10. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_75998823_19030434.pdf (дата обращения: 27.02.2026). DOI: 10.26526/2307-9401-2024-3-6-10.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование: Исследования проведены в рамках государственного задания Министерства сельского хозяйства Российской Федерации (тема № 102503-2600073-9-4.1.1-4.1.1).

Financing: The research was conducted within the framework of the state assignment of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation (topic no. 102503-2600073-9-4.1.1-4.1.1).

СТАТЬЯ

УДК 528.41

DOI 10.17513/use.38506



CC BY 4.0

СОЗДАНИЕ ПЛАНОВО-ВЫСОТНОЙ ОСНОВЫ ДЛЯ РЕКОНСТРУКЦИИ МОСТА НА ТЕРРИТОРИИ СЕЛЬСКОГО ПОСЕЛЕНИЯ ЛЕРМОНТОВО В ТУАПСИНСКОМ РАЙОНЕ

Солодунов А. А. ORCID ID 0000-0001-6609-9398,

Пшидаток С. К. ORCID ID 0000-0001-8514-8677, Гайтян Е. А.

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина»,
Краснодар, Российская Федерация, e-mail: 2602555@mail.ru*

В статье рассмотрены топографо-геодезические изыскания, выполненные с целью создания инженерно-топографического плана для получения данных в полном объеме при дальнейшей разработке проектной документации и строительства мостового перехода в селе Лермонтово Туапсинского района. Цель данного исследования заключается в систематизации специфики выполнения топографо-геодезических задач при реконструкции моста. Мосты, будучи фундаментальными компонентами транспортной инфраструктуры, подвергаются постоянным механическим и климатическим нагрузкам, что вызывает естественный износ и обуславливает необходимость проведения регулярных мероприятий по процессу восстановления эксплуатационных характеристик. Актуальность исследования обусловлена необходимостью обеспечения высокой точности и надежности строительных работ в условиях сложного рельефа и плотной застройки. На основе данных технического отчета проанализированы методы исполнительной съемки. Создаются планово-высотные геодезические сети, и осуществляется предварительная обработка и анализ полученных материалов, с целью осуществления контроля их точности, качества и полноты. Участок характеризуется сложными инженерно-геологическими и планировочными условиями, пересеченным рельефом, наличием действующих транспортных коммуникаций и инженерных сетей. Полученные результаты имеют практическое значение для оптимизации топографо-геодезического сопровождения аналогичных объектов. Реконструкция мостов представляет собой достаточно важную инженерную задачу, требующую высокой степени точности на всех этапах реализации проекта. Данный процесс включает в себя не только технические аспекты, но и тщательное планирование, анализ и контроль качества выполнения работ.

Ключевые слова: топографо-геодезические работы, исполнительная съемка, мостовое сооружение, данные полевых геодезических измерений, реконструкция моста, конструктивные элементы, эксплуатация объекта

CREATION OF A PLANNED HIGH-RISE BASE FOR THE RECONSTRUCTION OF THE BRIDGE IN THE TERRITORY OF THE RURAL SETTLEMENT OF LERMONTOVO IN THE TUAPSE REGION

Solodunov A. A. ORCID ID 0000-0001-6609-9398,

Pshidatok S. K. ORCID ID 0000-0001-8514-8677, Gaytyan E. A.

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
"Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin",
Krasnodar, Russian Federation, e-mail: 2602555@mail.ru*

The article considers topographic and geodetic surveys carried out in order to create an engineering and topographic plan for obtaining data in full during the further development of design documentation and the construction of a bridge crossing in the village of Lermontovo, Tuapse district. The purpose of this study is to systematize the specifics of performing topographic and geodetic tasks during the reconstruction of the bridge. Bridges, being fundamental components of the transport infrastructure, are subjected to constant mechanical and climatic stresses, which causes natural wear and necessitates regular measures to restore operational characteristics. The relevance of the research is due to the need to ensure high accuracy and reliability of construction work in conditions of difficult terrain and dense buildings. Based on the data from the technical report, the methods of executive shooting are analyzed. Planned high-altitude geodetic networks are being created, and preliminary processing and analysis of the obtained materials are carried out in order to control their accuracy, quality and completeness. The site is characterized by complex engineering, geological and planning conditions, rugged terrain, the presence of existing transport communications and engineering networks. The results obtained are of practical importance for optimizing topographic and geodetic support of similar objects. The reconstruction of bridges is a fairly important engineering task that requires a high degree of accuracy at all stages of the project. This process includes not only technical aspects, but also careful planning, analysis and quality control of work.

Keywords: topographic and geodetic works, reconstruction of the bridge, executive survey, bridge construction, field geodetic measurements, structural elements, operation of the facility

Введение

Реконструкция мостовых сооружений является сложным и ответственным процессом, требующим высокой точности на всех стадиях выполнения работ. Мосты, являясь ключевыми элементами транспортной инфраструктуры, подвержены постоянным нагрузкам и воздействию внешней среды, что приводит к их естественному износу и необходимости в реконструкции [1]. В сельском поселении Лермонтово Туапсинского района Краснодарского края, как и в других населенных пунктах, есть необходимость в улучшении и поддержании транспортной артерии [2]. В процессе данного исследования активное участие приняли преподаватели кафедры геодезии Кубанского государственного аграрного университета. Мостовое сооружение, расположенное на его территории, играет важную роль в обеспечении транспортной связи между двумя частями посёлка и равной доступности к инфраструктуре для всех жителей. Топографо-геодезические работы являются основополагающими для успешной реконструкции моста. Они позволяют получить точную информацию о существующем положении объекта, выявить деформации, определить оптимальные пути решения проектных задач и обеспечить точное положение всех строительных элементов в пространстве [3]. Неточности на этапе геодезических работ могут привести к серьезным проблемам, включая перерасход денежных средств, увеличение сроков строительства, и к снижению безопасности самого сооружения [4].

Целью настоящего исследования является систематизация особенностей выполнения топографо-геодезических работ при реконструкции мостового сооружения.

Материалы и методы исследования

Объект исследования находится в сельском поселении Лермонтово Туапсинского района. В качестве материалов исследования использовались проектная документация, данные полевых геодезических измерений, исполнительная документация и др. Важным этапом для достижения цели реконструкции мостового сооружения является обеспечение условий, при которых оси опор, пролетные строения и другие конструктивные элементы будут располагаться на участке по строго заданным проектным координатам. Для этого необходимо с высокой точностью выполнить разбивку пунктов и осуществить контроль на всех этапах работ [5].

Результаты исследования и их обсуждения

Одним из важнейших видов инженерных изысканий для строительства является инженерная геодезия. Инженерно-геодезические изыскания в строительстве обеспечивают получение топографо-геодезических материалов и данных о рельефе местности, о существующих зданиях и сооружениях, об элементах планировки, необходимых для оценки природных и техногенных условий территорий предполагаемого строительства и обоснования проектирования строительства и эксплуатации объектов [6].

Основной результат проведения инженерно-геодезических изысканий – получение инженерно-топографического плана территории. План содержит показатели, характеризующие рельеф и ситуацию изучаемой местности, определение наличия на ней зданий и строений, способных создать препятствия в процессе строительства [7]. Если топографический план призван отобразить точные и подробные изображения местности с населенными пунктами, рельефом и другими объектами, то инженерно-топографический план в первую очередь определяет площадь земельного участка, его размеры и координаты, характер и особенности строения земной коры, а также наличие протяженных коммуникаций [8]. Под топографо-геодезическими работами понимают сложный комплекс измерений, вычислений и построений, который сопровождает любой проект: от строительства частного дома до прокладки федеральных трасс [9].

В качестве объекта инженерно-геодезических изысканий рассматривается мостовое сооружение в сельском поселении Лермонтово Туапсинского района. Участок работ в административном отношении расположен в Туапсинском районе, муниципальное образование Тенгинское сельское поселение, село Лермонтово. Участок изысканий представляет собой участок улицы Ленина на пересечении с р. Шапсухо. Участок начинается с перекрестка с улицей Тенгинской, проходит через перекресток с ул. Совхозной, пересекает р. Шапсухо и оканчивается на перекрестке с ул. Ипподромной. Вся площадка представляет собой застроенную часть поселения, по которой проходят подземные, наземные коммуникации.

Объект работ связан с другими населенными пунктами автомобильным транспортом. По территории участка изысканий проходит хорошо развитая дорожная сеть ав-

томобильных проездов, с различными типами твердого покрытия (асфальтобетонное, гравийное). Проезд к площадке изысканий возможен в любое время года от автомобильной дороги Джубга – Туапсе. Железнодорожное сообщение к площадке изысканий отсутствует. Растительный покров в границах площадки изысканий представлен на незастроенных территориях в основном луговой растительностью, на застроенной территории – газонами с однолетней и многолетней растительностью, с участками луговой растительности. На территории участка изысканий естественная древесная растительность отсутствует. Участок характеризуется благоприятными условиями для проведения полевых работ: отсутствуют технические барьеры и зоны с выраженной заболоченностью (рис. 1).

На всех этапах строительства сооружений требуется высокая точность исполнения проекта, которая обеспечивается инженерно-геодезическими работами [10].

На подготовительном этапе выполнено обследование пунктов опорной сети и государственной геодезической сети. Целью данного этапа является формирование информационной базы и обоснование методики работ, этап является ключевым, так как на данной стадии закладываются основы точности и надежности последующих измерений. Было установлено, что изыскания прошлых лет отсутствуют. Установленные допуски по планово-высотному положению точек съемочной сети обеспечивают возможность использования полученных материалов при проектировании и строительстве.



Рис. 1. Схема расположения объекта работ

Примечание: составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследования

Таблица 1

Каталог координат исходных геодезических пунктов (в МСК-23)

Наименование пункта	Координата X	Координата У	Данные о состоянии пункта
п.п. 1 (1672)	397229,880	1361696,510	хорошее
п.п. 2 (2467)	396528,070	1361750,410	хорошее
п.п. 3 (2570)	397922,560	1361881,850	хорошее
п.п. 4 (2581)	397935,810	1361663,640	хорошее
п.п. 5 (3136)	397695,760	1361050,680	хорошее

Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования.

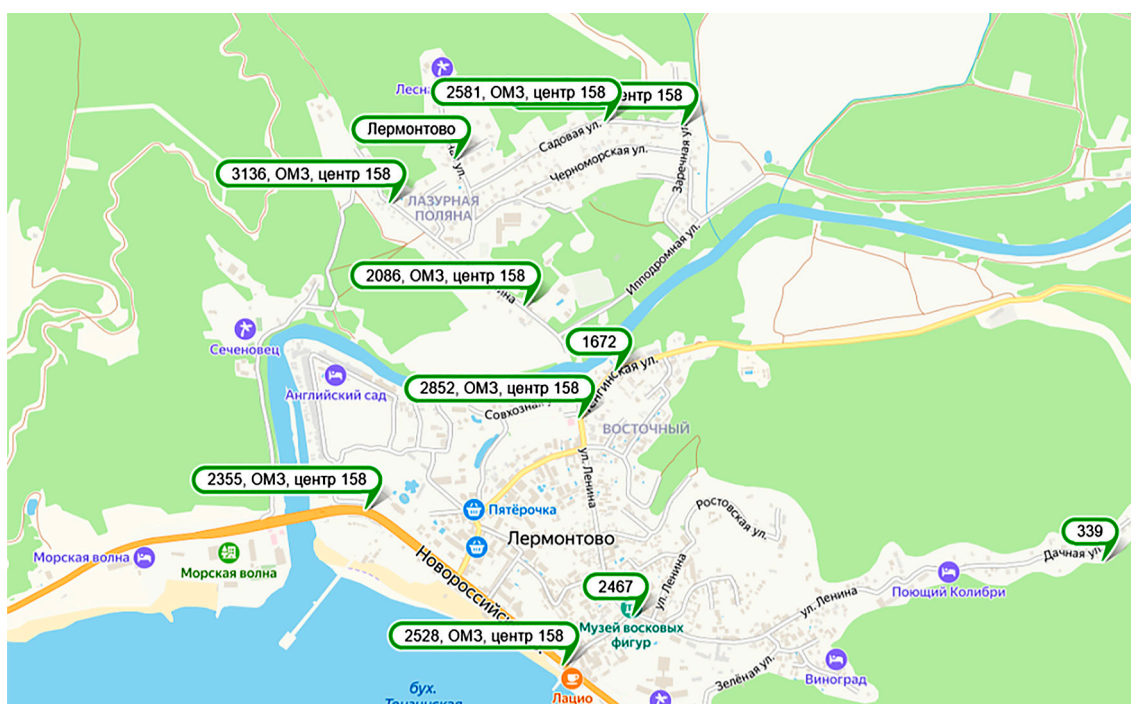


Рис. 2. Схема расположения исходных пунктов

Примечание: составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследования

Одним из ключевых работ полевого этапа стало выявление и обследование пунктов на местности. После нахождения нужного пункта проводилась визуальная оценка состояния наружных знаков и центров. Согласно информации, полученной из Росреестра, по карточкам привязок устанавливались пригодные к дальнейшему использованию пункты. Оценка проводилась следующим образом: если верхняя марка пункта цела, вскрытие нижних центров не требуется – такой пункт считается сохранным; при утрате нижнего центра пункт признается утраченным; при отсутствии следов разрушения, но невозможности обнаружения – пункт классифицируется как не найденный.

Все данные по обследованию сводились в итоговую ведомость. Каталог координат исходных геодезических пунктов представлен в таблице 1.

Обследование включало визуальный осмотр пунктов, оценку их сохранности, доступности и пригодности для использования [11]. Также произведено закрепление различными типами центров и наружных знаков пунктов ГГС и ОГС, определение координат и высот пунктов ОГС [12] (рис. 2).

Пункты ГГС, пункты опорной сети сгущения закреплены различными типами центров и наружных знаков. Результаты обследования пунктов приведены в таблице 2.

Таблица 2

Ведомость обследования исходных пунктов

№	Тип и высота знака	Номер пункта, класс, тип центра	Состояние центра	Состояние наружного знака
1	п. полигонометрии	1672, 1 разряд, центр 158	хорошее	хорошее
2	п. полигонометрии	2467, 1 разряд, центр 158	хорошее	хорошее
3	п. полигонометрии	2570, 1 разряд, центр 158	хорошее	хорошее
4	п. полигонометрии	2581, 1 разряд, центр 158	хорошее	хорошее
5	п. полигонометрии	3136, 1 разряд, центр 158	хорошее	хорошее

Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования.

Объект топографо-геодезических работ расположен на территории сельского поселения Туапсинского района Краснодарского края в зоне реконструкции моста через реку. Общая площадь участка изысканий определена по материалам технического задания и составила 2,65 га. В ходе рекогносцировочного обследования территории, отведенной под инженерные изыскания, были уточнены исходные данные, необходимые для организации и последующего выполнения топографо-геодезических работ. В первую очередь определялись фактические границы участков, подлежащих съемке, а также актуальное состояние пунктов ГГС и пунктов ГНСС. Особое внимание уделялось обследованию ранее заложенных реперов и центров, с оценкой их технического состояния и пригодности к повторному использованию. После этого приступали к работам, которые включают создание и развитие геодезических сетей, в том числе и сетей специального назначения [13]. Производилась съемка подземных и наземных сооружений.

Работы проводились с использованием ГЛОНАСС/GPS. Также использовались следующие средства измерения: дальномер лазерный Leica DISTO A5 Госреестр № 30855-07, спутниковая геодезическая аппаратура Trimble R8 GNSS Госреестр № 33967-07, электронный тахеометр Nikon NPR-332 (5") Госреестр № 39639-08, оптический нивелир с компенсатором CST/bergerSAL28 Госреестр № 44548-10.

На момент проведения изысканий вследствие значительной утраты пунктов опорной геодезической сети для обеспечения точности создания планово-высотного обоснования потребовалось произвести развитие опорной геодезической сети с использованием спутниковых тех-

нологий. При производстве спутниковых геодезических наблюдений применялись геодезические приемники фирмы Trimble модели R8-2 GNSS № 4750142932, № 4750142933, № 4750142943, прошедшие метрологическую поверку в соответствии с требованиями законодательства и действующей нормативно-технической документации.

Планово-геодезическая основа при развитии съемочного обоснования для производства инженерно-топографической съемки в масштабе 1:500, сечением рельефа 0,5 м, на территории площадки инженерных изысканий создана прокладыванием теодолитных ходов с относительной погрешностью 1/2000 от пунктов опорной сети ВР1, ВР2, ВР3. При прокладке теодолитных ходов съемочной геодезической сети использовался электронный тахеометр Nikon NPR-332(5") Госреестр № 39639-08.

При производстве измерений на пунктах сети применялись статический или быстрый статический способы, которые обеспечивали наивысшую точность измерений. При проектировании и закладке новых пунктов особое внимание уделялось выбору оптимальных по условиям наблюдения и эксплуатации площадок. Всего в результате полевых работ было заложено 3 новых пункта опорной геодезической сети с привязкой к пунктам государственной геодезической сети, для которых были подготовлены, в соответствии с техническим заданием, карточки закладок.

Высотным обоснованием топографической съемки послужили ходы технического нивелирования от пунктов ВР1, ВР2, ВР3, закрепленные постоянными знаками [14]. Каталог координат точек, закрепленных постоянными знаками, представлен в таблице 3.

Таблица 3

Каталог координат точек, закрепленных постоянными знаками

Наименование пункта	Координата X	Координата У
BP1	397349,610	1361486,100
BP2	397255,560	1361520,310
BP3	397109,382	1361620,409

Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования.

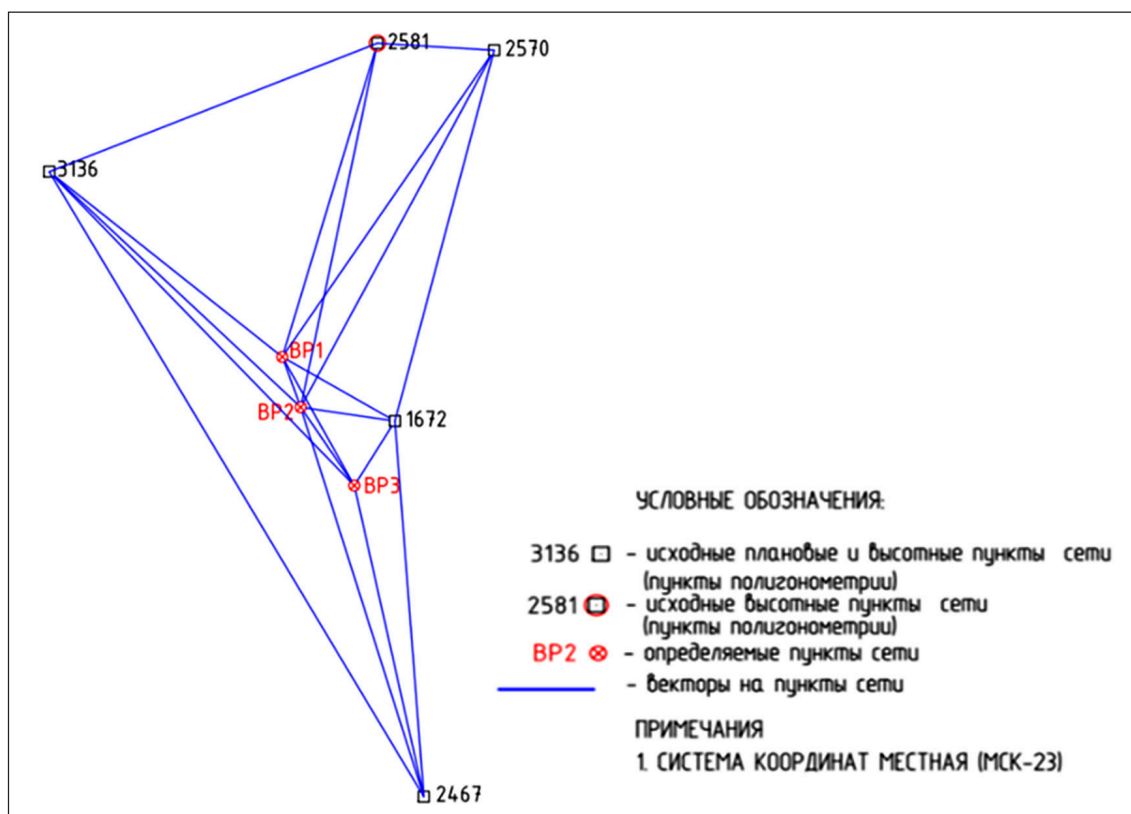


Рис. 3. Схема GPS-наблюдений

Примечание: составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследования

Таблица 4

Уравненные плоские координаты

Название точки	Север X (метр)	Север X Ошибка (метр)	Восточное указание (метр)	Восточное указание Ошибка (метр)	Возвышение (метр)	Возвышение Ошибка (метр)	Фиксирование
BP1	397349,61	0,018	1361486,10	0,018	3,56	0,023	
BP2	397255,56	0,018	1361520,31	0,018	2,50	0,023	
BP3	397109,38	0,019	1361620,41	0,019	4,19	0,024	
1672	397229,88	-	1361696,51	-	4,17	-	XУе
2467	396528,07	-	1361750,41	-	8,58	-	XУе
2570	397922,56	-	1361881,85	-	8,21	-	XУе
2581	397935,81	0,020	1361663,64	0,029	13,78	-	e
3136	397695,76	-	1361050,68	-	14,03	-	XУе

Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования.

Таблица 5

Расчет сметной стоимости работ

Вид работ	Показатель/ значение	Значение
Создание пунктов плановой опорной геодезической сети без закладки центров методом спутниковых геодезических определений		
П.43 таблица 6	3	
П.44 таблица 7	47051	
Кол-во реперов	3	
Повышающий коэффициент	1,5	260427
Закладка центров (реперов) пунктов опорной геодезической сети глубиной 2 м		
П.50 таблица 13	2	
П.49 таблица 12	26188	
Кол-во реперов	3	96634
Топографическая съемка тахеометрическим методом и сочетанием тахеометрического метода с методом спутниковых геодезических определений с высотой сечения рельефа через 0,5 м		
П.56 таблица 17	3	
Масштаб	1:500	
П.56 таблица 18, площадь, га	2,65	
ПЗп	54785	
П.58	0,9	
Территория	Застроенная	160715
Показатели затрат на полевые работы по съемке выходов подземных инженерных коммуникаций на поверхность земли		
П 108 таблица 45, площадь работ	2,65	
ПЗ	4757	15505
Показатели затрат на полевые работы по поиску и съемке подземных инженерных коммуникаций при помощи трубокабелеискателя		
П 109 таблица 46, площадь работ	2,65	
ПЗ	16030	52250
Показатели затрат на камеральные работы по нанесению подземных инженерных коммуникаций с их техническими характеристиками		
Масштаб	1:500	
Кол-во подземных коммуникаций	5	
П.120 таблица 51, площадь, га	2,65	
ПЗ1	643	
ПЗ2	1018	4109
Затраты на камеральные работы по созданию инженерно-топографического плана		
П.56 таблица 17	3	
П.114 таблица 47, площадь, га	2,65	
Масштаб	1:500	
ПЗ1	5061	
ПЗ2	8934	
Территория	Застроенная	35345
Подготовка технического отчета		
П.174 таблица 81	61500	61500
Транспортные расходы П.28 таблица 3 (%)	10,4	64998
Всего		751483
НДС		165326
Итого		916809

Измерения превышений производились нивелиром CST/bergerSAL28 Госреестр № 44548-10. Для производства работ по топографической съемке был использован электронный тахеометр фирмы Nikon NPR-332(5'') Госреестр № 39639-08 с регистрацией и накоплением результатов во внутреннюю память инструмента. Инструмент прошел поверку, свидетельство о поверке № 025382.

Все измерения в период спутниковых наблюдений производились только во время благоприятного временного интервала [15]. Для этого перед началом работ было произведено планирование сеансов наблюдений с помощью ПО Planning фирмы Trimble. Работы по созданию плано-высотного съемочного обоснования с применением глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС/GPS производились статическим методом. Сеть создана в виде полигонов, включающих в себя ряды замкнутых фигур, перекрывающихся треугольников и геодезических четырехугольников, стороны которых образованы векторами. Схема ГЛОНАСС/GPS-наблюдений представлена на рисунке 3.

Работы по поиску и съемке подземных коммуникаций выполнялись путем обследования местности для отыскания на ней по внешним признакам местоположения и назначения подземных сооружений, а затем определялись участки трубопроводов и кабелей для поиска с помощью трубокабелеискателя RD2000CPS. Произведено обследование колодцев на местности и определены глубины залегания подземных коммуникаций. Координирование выходов, углов поворота и других точек подземных сооружений производилось полярным методом, с точек магистрального хода, электронным тахеометром NIKON NPR-332(5'').

Итоговые документы камерального этапа являются основой для принятия решений о продолжении монтажных работ и возведении объекта или необходимости вносить корректировки в разработку проекта.

Обработка полученных данных. Обработка базовых линий, получение векторов, уравнивание сети плано-высотного обоснования производилась на ПК с использованием программного обеспечения Trimble Business Center фирмы Trimble. Уравнивание опорной геодезической сети производилось параметрическим способом по методу наименьших квадратов, в Местной системе координат (МСК-23). Уравненные плоские координаты представлены в таблице 4.

Совместное уравнивание линейных и угловых измерений системы теодолитных ходов с узловыми точками выполнено на IBM PC с использованием модуля CREDO_DAT 2.0 программного комплекса CREDO. Уравнивание производилось параметрическим способом по критерию минимизации суммы квадратов поправок в измерения. При этом производилась полная оценка точности измерений в сети и положения каждого пункта.

Описание итоговой документации

Финансовый аспект остается одним из ключевых при выборе оборудования и методов для выполнения геодезических работ. Это связано с тем, что в современных приборах используются передовые технологии, что, в свою очередь, влияет на конечную стоимость, удерживая ее на достаточно высоком уровне. На формирование стоимости топографо-геодезических изысканий также оказывает влияние совокупность факторов, среди которых: масштаб и точность съемки, особенности застройки на участке, плотность и наличие подземных коммуникаций, выраженность и сложность рельефа, наличие растительности, а также гидрологические характеристики и сезонность проведения изысканий.

Для расчета используется Приказ № 812/пр от 2 декабря 2024 года, детальный расчет приведен в таблице 5.

Заключение

Проведена рекогносцировка местности, плано-высотной основы и плотности геодезической сети на участке исследований, определены и закреплены исходные пункты, обеспечена надежная производственная привязка при реконструкции мостового сооружения. Особое внимание уделено сохранности геодезических знаков и обеспечению непрерывности измерительной сети. Выполненные изыскания и полученные данные могут служить надежной основой для дальнейших этапов проектирования, строительства, эксплуатации моста на территории сельского поселения Лермонтово.

Все работы выполняются на территории сельского поселения Лермонтово Туапсинского района, соответственно, в смету берутся коэффициенты для застроенной территории, что значительно увеличивает стоимость работ. Другим важным фактором, который влияет на смету, является категория сложности работ. Таким образом, стоимость всех видов работ обойдется в 916 809 руб.

Список литературы

1. Подтелков В. В., Прокопенко А. В., Пшидадок С. К. К вопросу расчета платежей за выбросы загрязняющих веществ в атмосферу при строительстве логистических центров на примере ЛЦ «Адыгея-2» // Экономика и предпринимательство. 2019. № 1 (102). С. 1004-1007. EDN: PPDQSH.
2. Подтелков В. В., Пшидадок С. К. К вопросу хранения, переработки и утилизации производственных отходов предпринимательской деятельности крупных логистических центров на примере ЛЦ «Адыгея-2» // Экономика и предпринимательство. 2018. № 11 (100). С. 952-955. EDN: YPFIOI.
3. Пшидадок С. К., Турк Г. Г., Жарникова А. А., Лавренина Е. А. Геодезические изыскания при проектировании и прокладке нефтепровода // Актуальные научные исследования в современном мире. 2021. № 11-13 (79). С. 82-86. EDN: WSOVDJ.
4. Соколов Ю. Г., Губанова Н. Я., Гурский И. Н. К определению координат точек обратными угловыми засечками методом последовательных приближений // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2009. № 45. С. 49-56. EDN: JWCYIN.
5. Bepalov V., Turk G., Gurova O. Physical features of reducing air pollution for the operating conditions of the drying drum of brick factories // E3S Web of Conferences: Innovative Technologies in Environmental Science and Education, ITESE 2019, Divnomorskoe Village, 09–14 сентября 2019 года. Vol. 135. Divnomorskoe Village: EDP Sciences. 2019. P. 01034. DOI: 10.1051/e3sconf/201913501034. EDN: EDHBHS.
6. Савченко Ю. М., Турк Г. Г., Гурский И. Н. Современные возможности использования фотограмметрии // Московский экономический журнал. 2024. Т. 9. № 1. DOI: 10.55186/2413046X_2023_9_1_49. EDN: BFWWII.
7. Савченко Ю. М., Турк Г. Г. Безопасность при производстве работ // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2023. № 191. С. 61-75. DOI: 10.21515/1990-4665-191-013. EDN: ARDFZW.
8. Gura D., Boltenkova K., Bespyatchuk D. [et al.] Practical implementation of the use of GNSS RTK technologies for obtaining topographic and geodetic data // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Ussurijsk, 20–21 июня 2021 года. Ussurijsk, 2021. P. 042075. DOI: 10.1088/1755-1315/937/4/042075. EDN: ZIIYAA.
9. Gura D., Gribkova I., Berkova E. [et al.] Creation of a digital map for Sochi city masterplan development in the modern geoinformation system ArcGIS // E3S Web of Conferences. 2024. Vol. 531. P. 04007. DOI: 10.1051/e3sconf/202453104007. EDN: WYPEIW.
10. Солодунов А. А., Смоляков Д. С., Разгоняев С. В., Ерж А. С. Результаты сравнительного анализа орбитальных группировок глобальных навигационных спутниковых систем // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2022. № 183. С. 274-291. DOI: 10.21515/1990-4665-183-027. EDN: DAKAXZ.
11. Солодунов А. А. Мониторинг эксплуатационной надежности сооружений внутрихозяйственной сети рисовых оросительных систем // Вестник Чувашской государственной сельскохозяйственной академии. 2019. № 4 (11). С. 126-131. DOI: 10.17022/bj7-tx55. EDN: NNZIJQ.
12. Струсь С. С., Смоляков Д. С., Солодунов А. А. Структура системы управления земельными ресурсами с учетом эколого-экономических факторов // Экономика и предпринимательство. 2013. № 4 (33). С. 237-241. EDN: PWWNWP.
13. Бондарчук А. В., Перов А. Ю. Использование спутниковых данных для мониторинга негативных процессов на землях сельскохозяйственного назначения Краснодарского края // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. 2024. Т. 18. № 4. С. 45-55. DOI: 10.31161/1995-0675-2024-18-4-45-55. EDN: BVZHHV.
14. Туров Д. И., Гура Д. А., Шевченко Г. Г., Гура Т. А. Комплекс геодезических работ для составления пространственных обмерных чертежей подземных сооружений на примере ГЭС // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». 2017. № 4. С. 51-59. EDN: ZKAONX.
15. Струсь С. С. Основные направления экологически устойчивого развития экономики города // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2009. № 45. С. 145-154. EDN: JWCYKV.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.