



ИД «Академия Естествознания»

УСПЕХИ СОВРЕМЕННОГО ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

Научный журнал

№ 9 2026



ADVANCES IN CURRENT NATURAL SCIENCES

Scientific journal

No. 9 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

30.09.2026

Дата выхода номера

30.10.2026

Формат

60х90 1/8

Усл. печ. л.

7,75

Тираж

1000 экз.

Заказ

УСЕ 2026/9

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 **Sokolskaya O.B.** (Saratov); D.Sc., Prof. **Stepanov V.V.** (Saint Petersburg); D.Sc. **Teplukhin V.K.** (Oktyabr'skiy); D.Sc., Prof. **Titov V.N.** (Saratov); D.Sc., 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

Telephone

+7 (499) 705-72-30

Signed for print

30.09.2026

Number issue date

30.10.2026

Format

60x90 1/8

Conditionally printed sheets

7,75

Circulation

1000 copies

Order

YCE 2026/9

Distribution at a free price

© LLC PH Academy of Natural History

СОДЕРЖАНИЕ

Сельскохозяйственные науки (4.1.1 Общее земледелие и растениеводство)

СТАТЬЯ

ОЦЕНКА ГЕНОТИПОВ ЧЕРЕШНИ (<i>PRUNUS AVIUM</i> L.), СОБРАННЫХ В ТЕРТЕРСКОМ И АГДАШСКОМ РАЙОНАХ, НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАТИВНОГО ФЕНОТИПИЧЕСКОГО И МОЛЕКУЛЯРНОГО ПОДХОДОВ	
<i>Керимова Х. И.</i>	6

Географические науки (1.6.8, 1.6.12, 1.6.13, 1.6.21)

СТАТЬИ

СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И СОЦИОКУЛЬТУРНЫЕ УСЛОВИЯ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗВИТИЯ ТЕРРИТОРИИ	
<i>Ардашев Р. Г.</i>	20
РАЗВИТИЕ ТЕРРИТОРИАЛЬНОЙ РЕКРЕАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ НА ОЗЕРЕ ЭБЕЙТЫ (ОМСКАЯ ОБЛАСТЬ)	
<i>Демешко В. Н., Кацнель С. А., Кулагина Е. В., Солодовникова Ю. Р., Лукина О. В.</i>	27
МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ РИСКОВ НА ТЕРРИТОРИИ С МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТОЙ (НА ПРИМЕРЕ МАГАДАНСКОЙ ОБЛАСТИ)	
<i>Окаёмова Е. С., Науменко А. А., Широков Р. С.</i>	35

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

СТАТЬЯ

К ВОПРОСУ ПРИМЕНЕНИЯ КОСВЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ СКВАЖИННЫМ ИНКЛИНОМЕТРОМ В СИСТЕМЕ СТРУКТУРНОГО МОНИТОРИНГА	
<i>Кривошеев К. В., Бондаревский В. Д.</i>	47

Физико-математические науки (1.6.22)

СТАТЬЯ

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗОН ОТТАЙКИ МЕРЗЛЫХ ПОРОД	
<i>Федоров В. Н., Куляндин Г. А.</i>	55

CONTENTS

Agricultural Sciences (4.1.1 General Agriculture and Plant Growing)

ARTICLE

ASSESSMENT OF SWEET CHERRY (*PRUNUS AVIUM* L.) GENOTYPES
COLLECTED IN THE TARTAR AND AGDASH DISTRICTS USING
AN INTEGRATIVE PHENOTYPIC AND MOLECULAR APPROACH

Karimova Kh. I.6

Geographical sciences (1.6.8, 1.6.12, 1.6.13, 1.6.21)

ARTICLES

SOCIO-ECONOMIC AND SOCIOCULTURAL CONDITIONS
OF GEO-SPATIAL DEVELOPMENT OF THE TERRITORY

Ardashev R. G.20

DEVELOPMENT OF THE TERRITORIAL RECREATIONAL SYSTEM
ON LAKE EBEITY (OMSK REGION)

*Demeshko V. N., Katsiel S. A., Kulagina E. V.,
Solodovnikova Y. R., Lukina O. V.*27

MODELING OF GEOECOLOGICAL RISKS IN A PERMAFROST AREA
(CASE STUDY OF MAGADAN OBLAST)

Okaemova E. S., Naumenko A. A., Shirokov R. S.35

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

ARTICLE

ON THE ISSUE OF APPLYING BOREHOLE INCLINOMETER'S INDIRECT
MEASUREMENT RESULTS IN A STRUCTURAL HEALTH MONITORING

Krivosheev K. V., Bondarevskiy V. D.47

Physical and mathematical sciences (1.6.22)

ARTICLE

ELECTRODYNAMIC MODELING OF FROZEN ROCK DEFROST ZONES

Fedorov V. N., Kulyandin G. A.55

СТАТЬЯ

УДК 634.232:575.2(479.24)
DOI 10.17513/use.38543



CC BY 4.0

**ОЦЕНКА ГЕНОТИПОВ ЧЕРЕШНИ (*PRUNUS AVIUM* L.),
СОБРАННЫХ В ТЕРТЕРСКОМ И АГДАШСКОМ РАЙОНАХ,
НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАТИВНОГО ФЕНОТИПИЧЕСКОГО
И МОЛЕКУЛЯРНОГО ПОДХОДОВ**

Керимова Х. И. ORCID ID 0009-0004-8041-6766

*Министерство науки и образования Азербайджанской Республики,
Институт генетических ресурсов, Баку, Азербайджанская Республика,
e-mail: xayalakerimova90@gmail.com*

Черешня (*Prunus avium* L.) представляет значимый объект для сохранения и использования местного генетического разнообразия в селекционных программах. Целью исследования была комплексная оценка морфологических, помологических, фенологических, биохимических и молекулярно-генетических характеристик генотипов черешни, собранных в Тертерском и Агдашском районах Азербайджана. Фенотипические признаки оценивали на основе международных дескрипторов, а генетическое разнообразие – с применением маркеров простых последовательных повторов. Исследование включало сравнительный анализ показателей вегетативного развития, фенологических фаз, характеристик плодов, биохимических признаков и молекулярных профилей генотипов из двух районов. Установлены межрегиональные различия по срокам прохождения фенологических фаз, параметрам вегетативного развития, массе плодов и мякоти, содержанию общего сахара и продолжительности хранения. Генотипы Агдашского района в среднем характеризовались более высокой массой плодов и мякоти, тогда как для генотипов Тертерского района были характерны несколько более высокое содержание сахаров и большая продолжительность хранения. Молекулярный анализ выявил различия в аллельных профилях исследованных генотипов и подтвердил наличие генетического разнообразия. Комплексная оценка фенотипических и молекулярно-генетических характеристик позволила охарактеризовать местный генотип черешни и выделить признаки, представляющие интерес для дальнейшего использования в селекции.

Ключевые слова: *Prunus avium* L., черешня, генетическое разнообразие, фенотипическая оценка, селекция, фенологические признаки, молекулярные маркеры, генетические ресурсы

**ASSESSMENT OF SWEET CHERRY (*PRUNUS AVIUM* L.) GENOTYPES
COLLECTED IN THE TARTAR AND AGDASH DISTRICTS USING
AN INTEGRATIVE PHENOTYPIC AND MOLECULAR APPROACH**

Karimova Kh. I. ORCID ID 0009-0004-8041-6766

*Institute of Genetic Resources, Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan,
Baku, Azerbaijan, e-mail: xayalakerimova90@gmail.com*

Sweet cherry (*Prunus avium* L.) is an important target for the conservation and utilization of local genetic diversity in breeding programs. The study aimed to comprehensively assess the morphological, pomological, phenological, biochemical, and molecular-genetic characteristics of sweet cherry genotypes collected in the Tartar and Agdash districts of Azerbaijan. Phenotypic traits were evaluated using international descriptors, while genetic diversity was assessed using simple sequence repeat markers. The study included a comparative analysis of vegetative growth, phenological phases, fruit characteristics, biochemical traits, and molecular profiles of genotypes from the two districts. Interregional differences were identified in the timing of phenological phases, vegetative growth parameters, fruit and flesh weight, total sugar content, and storage duration. Genotypes from the Agdash district were characterized, on average, by higher fruit and flesh weight, whereas genotypes from the Tartar district showed slightly higher sugar content and longer storage duration. Molecular analysis revealed differences in the allelic profiles of the studied genotypes and confirmed the presence of genetic diversity. The comprehensive assessment of phenotypic and molecular-genetic characteristics made it possible to characterize the local cherry germplasm and identify traits of interest for further use in breeding.

Keywords: *Prunus avium* L., sweet cherry, genetic diversity, phenotypic assessment, phenological traits, molecular markers, genetic resources, breeding

Введение

Черешня (*Prunus avium* L.) является одной из наиболее важных косточковых плодовых культур, характеризующейся высокой пищевой ценностью, богатым биохимическим составом и высокой экономической значимостью [1]. Данный вид относится к семейству Rosaceae, имеет диплоидный набор хромосом ($2n = 16$) и относительно

небольшой геном размером около 340 Мб [2, 3]. Достижения последних лет в области геномики и молекулярной генетики позволили более детально изучить генетическое разнообразие, популяционную структуру *P. avium* и геномные регионы, связанные с хозяйственно ценными признаками [1]. В частности, получение высококачественных референсных геномов и полногеномное

ресеквенирование открыли новые возможности для более эффективной оценки генетических ресурсов в селекционных программах и применения маркер-ориентированных подходов в селекции [1–3].

Основными целями селекции черешни являются создание новых сортов с высокой продуктивностью, крупными и качественными плодами, оптимальными сроками созревания, устойчивостью к болезням и абиотическим стрессовым факторам. Однако поскольку большинство этих признаков имеют полигенную природу и формируются под влиянием факторов окружающей среды, их оценка только на основе фенотипических признаков требует длительных наблюдений. Кроме того, длительный ювенильный период черешни, низкая эффективность гибридизации и продолжительность селекционного процесса, превышающая 15–20 лет, относятся к основным факторам, усложняющим создание новых сортов [4–6]. В связи с этим в последние годы широкое применение начали находить полногеномные ассоциативные исследования и картирование локусов количественных признаков. Одновременно подходы маркер-ассистированной селекции (MAS), основанные на SSR- и SNP-маркерах, стали неотъемлемой частью современных селекционных программ. SSR- и SNP-маркеры широко применяются для характеристики генетического разнообразия, оценки генетической структуры и молекулярной дифференциации генотипов, что расширяет возможности изучения и сохранения генетических ресурсов.

Качество плодов и фенологические особенности являются основными показателями, определяющими рыночную ценность черешни, потребительский спрос и направления селекции. Размер, масса, окраска и плотность плодов, содержание растворимых сухих веществ (TSS), титруемая кислотность, вкусовые качества и способность к хранению играют важную роль как при выборе черешни потребителями, так и при формировании коммерческой ценности продукции [7, 8]. Наряду с этим такие фенологические признаки, как распускание почек, цветение и сроки созревания плодов, являются основными критериями оценки адаптации сортов к различным климатическим условиям, устойчивости к весенним заморозкам и сроков выхода продукции на рынок [6, 9]. В современных селекционных программах совместная оценка морфологических, помологических и фенологи-

ческих показателей с молекулярными данными позволяет проводить комплексную характеристику генотипов, более надежно определять хозяйственно ценные признаки и отбирать перспективный селекционный материал [4, 5, 10].

В последние годы были проведены широкомасштабные исследования морфологических, фенологических и молекулярно-генетических характеристик черешни, в результате которых в различных странах были получены значимые результаты в области оценки генетического разнообразия и выявления перспективных генотипов [1, 10]. В Азербайджане также получены важные данные по документированию местного генофонда черешни на основе международных дескрипторов и его молекулярной характеристике с использованием маркеров простых последовательных повторов (SSR) [11, 12]. Последние молекулярно-генетические исследования, проведенные в Кавказском регионе, показали, что генотипы черешни азербайджанского происхождения характеризуются высоким аллельным разнообразием в S-локусе, а также позволили выявить новые S-аллели, ранее не описанные. Эти результаты подтверждают, что Азербайджан является одним из важных центров генетического разнообразия черешни, и дополнительно повышают потенциал использования местных генетических ресурсов в селекционных программах [13].

Вместе с тем исследования, посвященные комплексной оценке морфологических, помологических, фенологических и молекулярно-генетических характеристик генотипов черешни, собранных в Тертерском и Агдашском районах, на основе единого аналитического подхода остаются недостаточными. Устранение данного пробела может внести существенный вклад в комплексную оценку местных генетических ресурсов черешни, выявление перспективного селекционного материала и укрепление научной основы будущих селекционных программ.

Цель исследования – комплексная оценка морфологических, помологических, фенологических и молекулярно-генетических характеристик генотипов черешни (*Prunus avium* L.), собранных в Тертерском и Агдашском районах Азербайджана, на основе интегративного подхода, определение межрегионального генетического разнообразия, а также выявление перспективных генотипов для использования в селекционных программах.

Материалы и методы исследования*Исследуемый материал*

В исследование включены 12 генотипов черешни, собранных в Тертерском и Агдашском районах Азербайджана. Первоначальная морфологическая характеристика исследуемых генотипов была проведена в 2017–2020 гг., а соответствующие результаты были опубликованы ранее [11]. В 2020–2023 гг. регулярные фенологические наблюдения за исследуемыми генотипами не проводились в связи с ограничениями, связанными с пандемией COVID-19. В 2023–2025 гг. помологическая оценка плодов и фенологические наблюдения были проведены повторно в целях получения обновленных данных о характеристиках плодов, сроках прохождения основных фенологических фаз и дополнения паспортных данных генотипов. Таким образом, морфологические показатели, представленные в табл. 4, относятся к первоначальному периоду характеристики коллекционного материала (2017–2020 гг.), тогда как помологические и фенологические показатели, представленные в табл. 5 и 3 соответственно, основаны на наблюдениях и измерениях, проведенных в 2023–2025 гг. Молекулярно-генетическая паспортизация исследуемых генотипов с использованием SSR-маркеров была проведена в 2019 г. Все генотипы были отобраны на приусадебных участках (п/у), расположенных в соответствующих районах. Список и кодировка исследованных генотипов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Генотипы черешни (*Prunus avium* L.), использованные в исследовании

Код	Генотип (сорт)	Район
T1	Кара окюзюрэи	Тертер
T2	Зогалы	Тертер
T3	Чал Крым	Тертер
T4	Позднеспелый Кара окюзюрэи	Тертер
T5	Дикая черешня	Тертер
T6	Розовый Наполеон	Тертер
T7	Шампанская черешня	Тертер
T8	Белый Крым	Тертер
A1	Майская белая черешня	Агдаш
A2	Белая черешня	Агдаш
A3	Пестрая черешня	Агдаш
A4	Кара окюзюрэи	Агдаш

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

Морфологическая, помологическая и фенологическая оценка

Фенотипическая оценка проводилась в соответствии с руководством UPOV TG/35/7 «Sweet Cherry (*Prunus avium* L.). Guidelines for the Conduct of Tests for Distinctness, Uniformity and Stability», разработанным Международным союзом по охране новых сортов растений (UPOV) в 2006 г. [14]. При морфологической оценке определяли высоту дерева, форму роста, диаметр и объем кроны, диаметр ствола, длину, ширину и форму листовой пластинки. Помологическую оценку проводили для каждого генотипа на пяти деревьях в трех повторностях (R1, R2 и R3). В каждом повторении оценивали 20 плодов, 20 косточек и 20 плодоножек. Определяли массу, длину и ширину плода, длину плодоножки, длину, ширину и массу косточки, массу мякоти, общую массу 20 плодов, дегустационную оценку и продолжительность хранения плодов. Содержание сахаров определяли рефрактометрическим методом по показателю °Brix в соке плодов. Дегустационную оценку плодов проводили субъективным методом в соответствии с протоколом, использованным М. Chavoshi et al. (2014) и Т. Stegmeir et al. (2017) [15, 16]. Плоды черешни собирали в период полной зрелости и после доставки с полевых участков в лабораторию помещали в холодильник; дегустационную оценку проводили в день сбора. Оценку вкусовых качеств проводили по 5-балльной шкале. Для каждого показателя сначала рассчитывали среднее арифметическое значение в пределах каждого повторения, после чего итоговое среднее арифметическое значение и стандартное отклонение (SD) рассчитывали по трем повторностям (R1–R3). Массу целого плода, мякоти и косточки определяли на одних и тех же плодах, что обеспечивало сопоставимость полученных значений.

Фенологические наблюдения проводили регулярно в течение вегетационного периода и регистрировали распускание почек, распускание листьев, начало цветения, полное цветение, окончание цветения, созревание плодов, листопад и продолжительность вегетационного периода. Фенологические показатели, представленные в настоящей работе, основаны на наблюдениях, проведенных в 2023–2025 гг. Морфологические и помологические показатели, использованные для сравнительного анализа, включают ранее опубликованные данные первоначальной характеристики исследуемого коллекционного материала [11]. В соответ-

ствующих таблицах представлены средние значения показателей и стандартное отклонение (mean $\pm$ SD).

Экстракция ДНК и SSR-анализ

Для оценки генетического разнообразия использовали систему маркеров простых последовательных повторов (Simple Sequence Repeats, SSR). Геномную ДНК экстрагировали из образцов молодых листьев на основе модифицированного варианта метода СТАВ, описанного Doyle и Doyle [17]. Качество выделенной ДНК оценивали методом электрофореза в агарозном геле, а концентрацию ДНК определяли спектрофотометрическим методом. Полученную ДНК использовали для последующего молекулярного анализа.

Амплификацию SSR-локусов проводили методом полимеразной цепной реакции (ПЦР) на приборе Veriti™ 96-Well Thermal Cycler (Applied Biosystems, Thermo Fisher Scientific, США) в общем объеме 20 мкл. Реакционная смесь содержала 13,3 мкл ddH₂O, 2,0 мкл ПЦР-буфера, 2,0 мкл dNTP (2 мМ), по 0,25 мкл прямого и обратного праймеров (10 pmol/мкл), 0,2 мкл Taq-полимеразы (1 U/мкл) и 2,0 мкл ДНК (50 нг/мкл). В исследовании использовали 12 SSR-маркеров. Температура отжига зависела от используемого праймера и составляла 50–56 °С; конкретные значения для каждого праймера приведены в табл. 2.

Таблица 2

SSR-праймеры, использованные в исследовании, температуры отжига и литературные источники

SSR-праймеры	Температура отжига (°C)	Литературный источник
PaCITA18	55	[18]
pchcms2	53	[19]
AK69	50	[20]
AK123	50	[20]
PaCITA10	55	[18]
PaCITA12	56	[18]
PaCITA14A	55	[18]
PaCITA14B	55	[18]
AK193	53	[20]
AK200	53	[20]
pchgms2	53	[19]
AK178	55	[20]

Примечание: составлена автором на основе полученных данных в ходе исследования

Температурный профиль ПЦР включал начальную денатурацию при 94 °С в течение 3 мин, затем 35 циклов, включавших денатурацию при 94 °С в течение 45 с, отжиг праймеров при соответствующей для каждого праймера температуре в течение 1 мин и элонгацию при 72 °С в течение 1 мин. Заключительную элонгацию проводили при 72 °С в течение 5 мин. Используемые в исследовании SSR-праймеры, температуры их отжига и литературные источники представлены в табл. 2.

Используемые в исследовании SSR-маркеры имеют различное происхождение. Маркеры PaCITA18, PaCITA10, PaCITA12, PaCITA14A и PaCITA14B были разработаны и описаны Lopes et al. (2002), маркеры pchcms2 и pchgms2 – Sosinski et al. (2000), а маркеры AK69, AK123, AK193, AK200 и AK178 – Köse et al. (2017) [18–20].

Генотипирование продуктов ПЦР

Генотипирование продуктов ПЦР проводили в соответствии с методом флуоресцентных M13-tailed праймеров, предложенным Schuelke [21]. Продукты амплификации получали с использованием праймеров, меченных флуоресцентными красителями 6-FAM, VIC, NED и PET. Далее продукты анализировали на системе капиллярного электрофореза ABI 3500 Genetic Analyzer (Applied Biosystems, Foster City, CA, США). При подготовке образцов использовали формамид Hi-Di™ и внутренний стандарт размера GeneScan™ 600 LIZ®. Денатурацию проводили при 94 °С в течение 5 мин, после чего образцы немедленно переносили на лед и после кратковременного центрифугирования анализировали на приборе.

Для каждого SSR-локуса в среде R рассчитывали количество аллелей (Na), наблюдаемую гетерозиготность (Ho), ожидаемую гетерозиготность (He) и индекс полиморфной информации (PIC). Для каждого SSR-локуса число успешно генотипированных образцов (N) определяли отдельно, исключая образцы с отсутствующими генотипическими данными. Наблюдаемую гетерозиготность (Ho) рассчитывали как долю гетерозиготных генотипов среди успешно генотипированных образцов, а ожидаемую гетерозиготность (He) – на основе частот выявленных аллелей. Индекс полиморфной информации (PIC) рассчитывали с учетом частот аллелей. Пропущенные генотипы в виде ?? в расчеты соответствующего локуса не включали.

Для оценки генетического сходства между образцами аллельные профили SSR-маркеров преобразовывали в бинарную матрицу присутствия/отсутствия аллелей. Генетическое расстояние между образцами рассчитывали с использованием коэффициента Жаккара, а кластеризацию проводили методом UPGMA.

Статистический анализ и визуализация данных

Статистическую обработку фенотипических данных проводили с использованием языка программирования R версии 4.x

(R Core Team, 2023) [22]. Для морфологических, помологических, фенологических и биохимических показателей рассчитывали описательную статистику (среднее значение $\pm$ стандартное отклонение (SD)). Для визуализации фенологических показателей использовали диаграмму Ганта, для сравнительного анализа морфологических, помологических и биохимических показателей – радиальную диаграмму (Radar chart). Перед построением радиальной диаграммы исходные значения показателей нормализовали в диапазоне от 0 до 1 методом min–max нормализации:

$$X_{\{norm\}} = \frac{X - X_{\{min\}}}{X_{\{max\}} - X_{\{min\}}},$$

где X – исходное значение показателя, X_{min} – минимальное и X_{max} – максимальное значения соответственно. Для визуализации генетического разнообразия по SSR-маркерам использовали тепловую карту (Heatmap). С целью выявления сходств и различий между генотипами проводили иерархический кластерный анализ. При представлении результатов использовали методы описательной статистики. Все графики и визуализации были подготовлены на языке программирования Python с использованием библиотек Pandas и Matplotlib.

Результаты исследования и их обсуждение

Сравнительная оценка фенологических показателей

Фенологические наблюдения показали, что генотипы черешни (*Prunus avium* L.), отобранные в Тертерском и Агдашском районах, различались по срокам наступления отдельных фаз вегетационного периода.

Распускание почек отмечалось в период с 10 по 15 марта, а распускание листьев – с 22 по 29 марта.

Таблица 3

Сравнительная характеристика фенологических показателей генотипов черешни (*Prunus avium* L.), собранных в Тертерском и Агдашском районах

Генотипы	Распускание почек	Распускание листьев	Цветение (Начало)	Цветение (Конец)	Продолжительность цветения, дни	Созревание плодов	Опадение листьев (Начало)	Опадение листьев (Конец)	Продолжительность вегетации, дни
T1	10.III	22.III	25.III	09.IV	15	10.VI	20.X	30.XI	265
T2	11.III	24.III	26.III	09.IV	14	11.VI	22.X	02.XII	266
T3	13.III	27.III	29.III	12.IV	14	10.VI	25.X	07.XII	269
T4	15.III	28.III	01.IV	13.IV	12	16.VI	28.X	08.XII	268
T5	11.III	24.III	28.III	07.IV	10	09.VI	25.X	06.XII	270
T6	15.III	27.III	30.III	10.IV	11	07.VI	22.X	04.XII	264
T7	10.III	23.III	27.III	08.IV	12	08.VI	23.X	05.XII	270
T8	11.III	24.III	28.III	09.IV	12	05.VI	20.X	03.XII	267
A1	12.III	26.III	29.III	11.IV	13	28.VI	22.X	06.XII	269
A2	15.III	27.III	31.III	12.IV	12	06.VI	24.X	04.XII	264
A3	14.III	28.III	01.IV	14.IV	13	08.VI	25.X	04.XII	265
A4	15.III	29.III	02.IV	13.IV	11	04.VI	22.X	05.XII	265

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

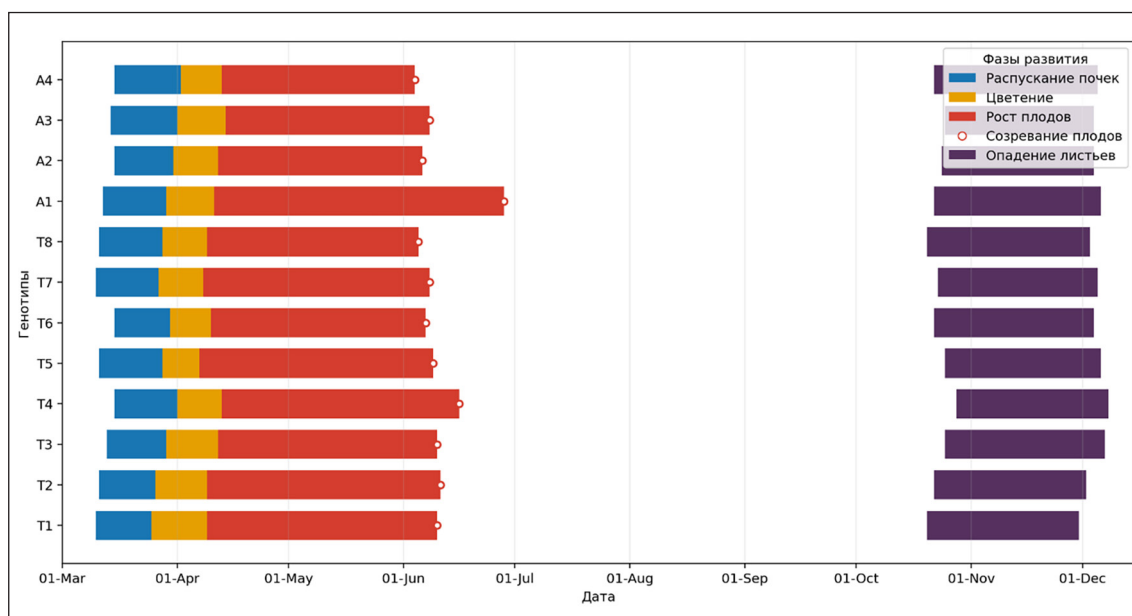


Рис. 1. Визуальное представление фенологических фаз генотипов черешни в виде диаграммы Ганта
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

Период цветения варьировал с 25 марта по 14 апреля, тогда как сроки созревания плодов – с 4 по 28 июня. Продолжительность вегетационного периода у генотипов варьировала от 264 до 270 дней. Продолжительность вегетационного периода определяли как период от даты распускания почек до окончания листопада. Результаты фенологических наблюдений представлены в табл. 3.

Как видно из табл. 3, у генотипов T1, T2, T7 и T8 распускание почек и цветение начинались раньше по сравнению с другими генотипами. Напротив, у генотипов A1, A3, A4 и T4 эти фазы наступали позднее. Сроки созревания плодов также различались между генотипами: у генотипов T8 и A4 отмечалось более раннее созревание, тогда как у генотипа A1 созревание происходило позднее.

Сравнительный анализ фенологических фаз показал, что генотипы Тертерского происхождения преимущественно характеризовались более ранним началом вегетации и цветения, тогда как у генотипов Агдашского происхождения вегетативное развитие и созревание плодов наблюдались позднее. Сравнительная визуализация сроков начала и окончания фенологических фаз представлена в виде диаграммы Ганта (рис. 1). На рис. 1 представлены последовательность фенологических фаз у различных генотипов и различия в сроках их наступления. Как видно из диаграммы, у генотипов Тертерского происхождения фазы вегетации

и цветения в целом начинались раньше, тогда как у генотипов Агдашского происхождения они начинались позднее.

Сравнительная оценка морфологических показателей

Сравнительный анализ морфологических показателей генотипов черешни, отобранных в Тертерском и Агдашском районах, по данным первичной характеристики 2017–2020 гг. показал наличие различий между регионами по уровню вегетативного развития. У генотипов Тертерского происхождения средняя высота дерева составляла $6,4 \pm 1,5$ м, средний диаметр ствола – $35,4 \pm 7,4$ см, средний диаметр кроны – $5,7 \pm 0,4$ м, а средний объем кроны – $111,4 \pm 36,2$ м³. У генотипов Агдашского происхождения соответствующие показатели составляли $5,9 \pm 1,1$ м, $25,0 \pm 10,8$ см, $5,2 \pm 0,5$ м и $83,6 \pm 26,2$ м³ соответственно. Полученные морфологические данные, характеризующие исходное состояние исследованных генотипов, представлены в табл. 4.

Как видно из табл. 4, в обоих регионах преимущественно преобладала округлая форма кроны. Вместе с тем у генотипов Тертерского происхождения встречалась овальная форма кроны, тогда как у генотипов Агдашского происхождения преобладала округлая форма. Пирамидальная форма кроны наблюдалась только у генотипа T7. Графическое представление морфологических показателей приведено на рис. 2.

Таблица 4

Морфологическая характеристика генотипов черешни (*Prunus avium* L.) по данным исследований 2017–2020 гг.

Регион	Возраст дерева (лет)	Высота дерева (м)	Диаметр ствола (см)	Диаметр кроны (м)	Объем кроны (м ³)	Преобладающая форма кроны
Тертер (Т1–Т8)	16,8 ± 4,2	6,4 ± 1,5	35,4 ± 7,4	5,7 ± 0,4	111,4 ± 36,2	Округлая/Овальная
Агдаш (А1–А4)	16,8 ± 6,2	5,9 ± 1,1	25,0 ± 10,8	5,2 ± 0,5	83,6 ± 26,2	Округлая/Круглая

Примечание: составлена автором на основе данных, полученных в ходе исследования

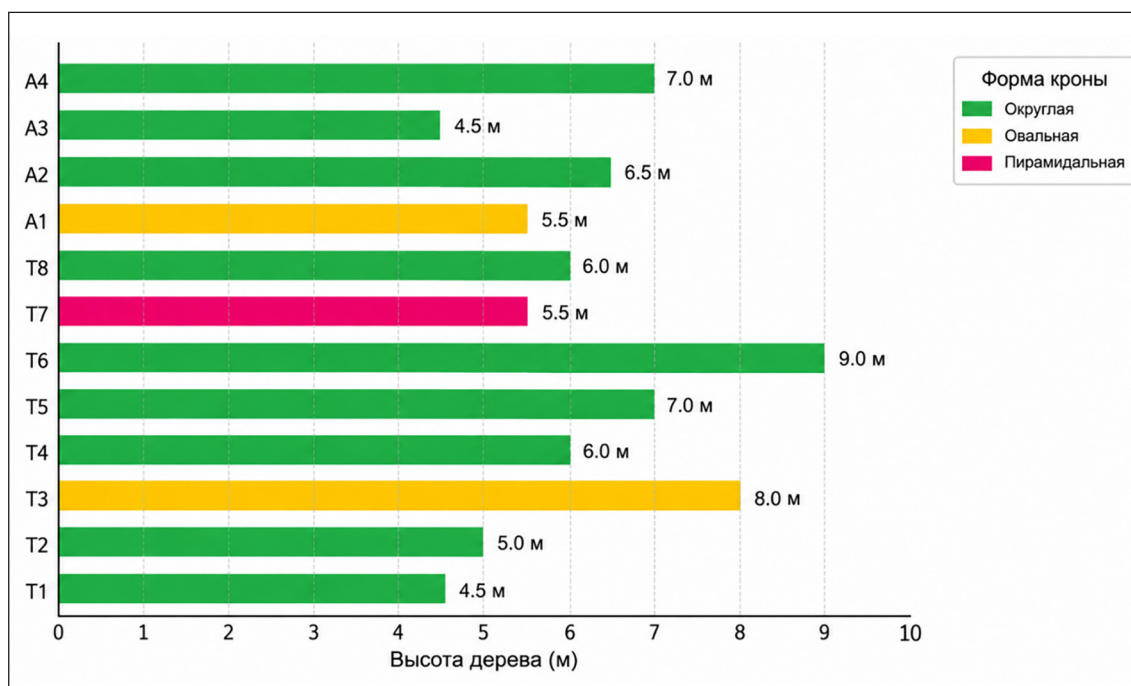


Рис. 2. Сравнительный график высоты деревьев и формы кроны генотипов черешни (*Prunus avium* L.), собранных в Тертерском и Агдашском районах

Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

Как видно из рис. 2, генотипы Тертерского происхождения в целом имели более высокие средние значения показателей вегетативного развития. Генотипы Агдашского происхождения, напротив, характеризовались относительно компактным типом роста. Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о наличии определенных морфологических различий между генотипами Тертерского и Агдашского происхождения по характеристикам вегетативного развития. Это разнообразие важно для выбора перспективных доноров и родительских форм в селекционных программах.

Сравнительная оценка помологических и биохимических показателей

Сравнительный анализ помологических и биохимических показателей генотипов черешни (*Prunus avium* L.), отобранных в Тертерском и Агдашском районах, выявил определенные различия по размерам и массе плодов, характеристикам косточки, морфологии листьев и общему содержанию сахаров. Сравнительные результаты помологических и биохимических показателей генотипов черешни (*Prunus avium* L.), собранных в Тертерском и Агдашском районах, представлены в табл. 5.

Таблица 5

Сравнительная характеристика морфометрических, биохимических и сенсорных показателей генотипов черешни (*Prunus avium* L.), собранных в Тертерском и Агдашском районах

Морфометрические и сенсорные показатели	Тертер (Т1–Т8) Среднее ± SD	Агдаш (А1–А4) Среднее ± SD	Примечание
Длина плода (мм)	18,1 ± 5,7	17,6 ± 2,4	Тертер показывает более широкую вариацию
Ширина плода (мм)	18,6 ± 6,3	18,3 ± 3,9	Сходные значения, различия незначительны
Длина плодоножки (мм)	40,0 ± 8,9	41,4 ± 8,9	Сходный уровень
Масса косточки (г)	0,52 ± 0,13	0,44 ± 0,18	В Тертере несколько выше
Масса мякоти (г)	5,9 ± 2,2	6,8 ± 1,5	Генотипы Агдаша имеют более мясистые плоды
Общее содержание сахаров (%)	19,9 ± 3,7	19,3 ± 2,7	Сходные значения, Тертер несколько слаще
Длина косточки (мм)	8,5 ± 1,5	8,3 ± 1,7	Различие минимальное
Ширина косточки (мм)	7,4 ± 1,5	8,1 ± 1,4	В Агдаше косточки несколько шире
Масса плода (г)	6,4 ± 2,2	7,2 ± 1,5	Плоды Агдаша более тяжелые
Масса 20 плодов (г)	128,6 ± 45,2	145,1 ± 33,2	Генотипы Агдаша имеют более крупные плоды
Длина черешка листа (мм)	34,8 ± 3,7	36,9 ± 2,8	В Агдаше несколько длиннее
Длина листа (мм)	85,8 ± 5,8	87,4 ± 7,5	Сходный уровень
Ширина листа (мм)	36,0 ± 2,9	41,5 ± 5,8	Листья генотипов Агдаша шире
Дегустационная оценка (баллы)	4,625 ± 0,72	4,75 ± 0,50	Вкус сходный, в Тертере вариация несколько выше
Продолжительность хранения (дни)	6,0 ± 0,82	5,5 ± 0,58	Плоды Тертера несколько более устойчивы

Примечание: составлена автором на основе данных, полученных в ходе исследования.

Как видно из табл. 5, у генотипов Тертерского происхождения средняя длина плода составляла 18,1 ± 5,7 мм, средняя ширина плода – 18,6 ± 6,3 мм, средняя масса косточки – 0,52 ± 0,13 г, а общее содержание сахаров – 19,9 ± 3,7 %. У генотипов Агдашского происхождения соответствующие показатели составляли 17,6 ± 2,4 мм, 18,3 ± 3,9 мм, 0,44 ± 0,18 г и 19,3 ± 2,7 % соответственно.

Средняя масса плода и общая масса 20 плодов были выше у генотипов Агдашского происхождения. В этой группе средняя масса плода составляла 7,2 ± 1,5 г, а общая масса 20 плодов – 145,1 ± 33,2 г. У генотипов Тертерского происхождения соответствующие показатели составляли 6,4 ± 2,2 г и 128,6 ± 45,2 г. У генотипов Агдашского происхождения также отмечались более высокие значения ширины листа и длины черешка листа по сравнению с генотипами Тертерского происхождения. Ширина листа у генотипов Агдашского происхождения составляла 41,5 ± 5,8 мм, а длина черешка листа – 36,9 ± 2,8 мм; данные показатели характеризовались более высокими значениями по сравнению с генотипами Тертерского происхождения.

Напротив, у генотипов Тертерского происхождения наблюдалась более широкая вариация по длине и ширине плодов, а средняя масса косточки и продолжительность хранения плодов были относительно выше. Средняя продолжительность хранения плодов у генотипов Тертерского происхождения составляла 6,0 ± 0,82 дня, тогда как у генотипов Агдашского происхождения – 5,5 ± 0,58 дня. Дегустационная оценка в обоих регионах была высокой, при этом между генотипами наблюдались лишь незначительные различия.

Таким образом, сравнительная оценка помологических, биохимических и сенсорных показателей показала наличие заметных различий между регионами по характеристикам качества плодов. Выявленные межрайонные различия следует интерпретировать с учетом возможного влияния условий среды, поскольку в настоящем исследовании эффекты генотипа и среды экспериментально не разделялись. Визуальная характеристика генотипов по форме плодов и окраске кожуры плодов представлена на рис. 3.

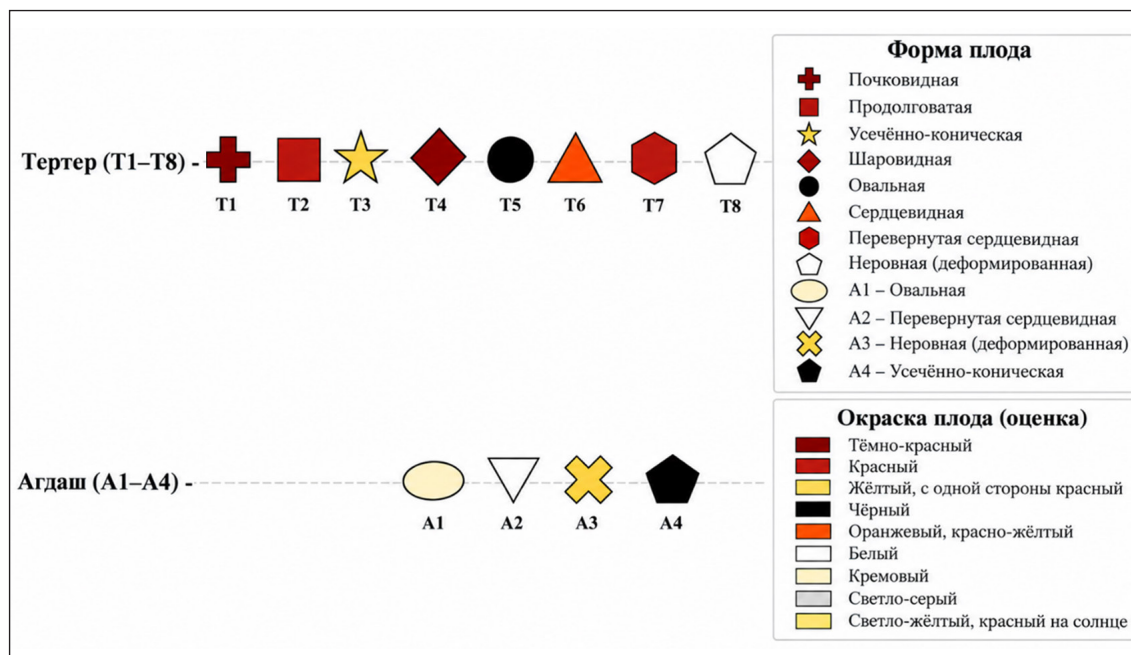


Рис. 3. Сравнительное описание формы плодов и окраски кожуры генотипов черешни (*Prunus avium* L.), собранных в Тертерском и Агдашском районах
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

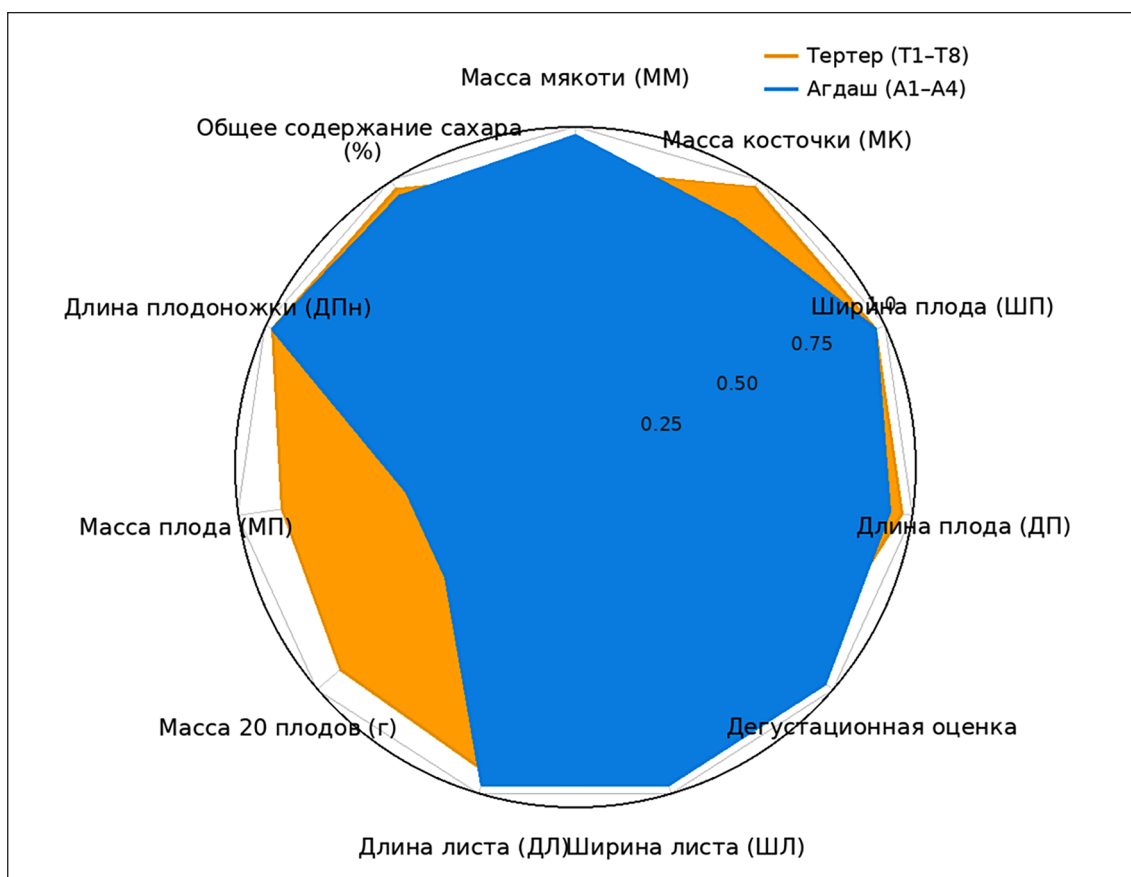


Рис. 4. Радиальная диаграмма помологических и биохимических показателей генотипов черешни (*Prunus avium* L.), собранных в Тертерском и Агдашском районах
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

Как видно из рис. 3, исследованные генотипы демонстрировали значительное фенотипическое разнообразие по форме, размеру и окраске плодов. Формы плодов были представлены округлыми, сердцевидными и плоско-округлыми типами, тогда как окраска кожуры варьировала от светло-желтой до темно-красной и почти черной. Это разнообразие отражает высокую степень фенотипической изменчивости генотипов и важно для выбора перспективных донорских форм в селекционных программах.

Комплексное сравнение помологических и биохимических показателей визуализировано с помощью радиальной диаграммы (рис. 4).

Анализ радиальной диаграммы показал, что генотипы Агдашского происхождения характеризовались относительно высокими значениями массы плода, массы мякоти, общей массы 20 плодов и ширины листа. У генотипов Тертерского происхождения более высокими были содержание общего сахара и продолжительность хранения плодов. По длине и ширине плода, длине плодоножки и дегустационной оценке между регионами были зарегистрированы сходные показатели. Радиальная диаграмма наглядно отражает помологическое разнообразие

генотипов обоих регионов и перспективные с точки зрения селекции признаки.

Оценка генетического разнообразия по SSR-маркерам

Для оценки молекулярно-генетического разнообразия генотипов черешни (*Prunus avium* L.) были использованы 12 SSR-маркеров. Аллельное разнообразие, уровень гетерозиготности и основные генетические параметры, характеризующие информативность SSR-маркеров, представлены в табл. 6.

Согласно результатам анализа, число аллелей по маркерам варьировало от 2 до 8, при этом среднее число аллелей составило 3,50. Наибольшее число аллелей было зарегистрировано у маркера AK193 (8 аллелей), тогда как у маркеров pchcmS 2, AK 69, AK 123, PaCITA 10, PaCITA 14B и AK 178 выявлено по 2 аллеля.

Ожидаемая гетерозиготность (H_e) по маркерам варьировала в пределах 0,270–0,833. Наиболее высокие значения H_e были выявлены у маркеров AK193 (0,833), PaCITA 18 (0,792) и AK 200 (0,694). Наблюдаемая гетерозиготность (H_o) находилась в диапазоне от 0 до 1,000. Наиболее высокие значения H_o отмечены у маркеров PaCITA 14B и AK 200 (по 1,000), а также у PaCITA 14A (0,900).

Таблица 6

Сравнительная характеристика аллельного разнообразия и основных генетических параметров SSR-маркеров у генотипов черешни (*Prunus avium* L.)

Маркер	N	Na	Ho	He	PIC
PaCITA 18	6	6	0,500	0,792	0,763
pchcmS 2	4	2	0,000	0,375	0,305
AK 69	5	2	0,000	0,320	0,269
AK 123	5	2	0,000	0,320	0,269
PaCITA 10	9	2	0,000	0,346	0,286
PaCITA 12	10	4	0,300	0,270	0,259
PaCITA 14A	10	3	0,900	0,585	0,495
PaCITA 14B	8	2	1,000	0,500	0,375
AK 193	9	8	0,778	0,833	0,813
AK 200	6	5	1,000	0,694	0,644
pchgmS 2	11	4	0,727	0,545	0,471
AK 178	12	2	0,083	0,330	0,275
Среднее	7,917	3,500	0,441	0,493	0,435

Примечание: составлена автором на основе данных, полученных в ходе исследования.

N – число успешно генотипированных образцов для соответствующего SSR-маркера; Na – число выявленных аллелей; Ho – наблюдаемая гетерозиготность; He – ожидаемая гетерозиготность; PIC – индекс полиморфной информации. Значения N различаются между маркерами в связи с наличием пропущенных генотипов.

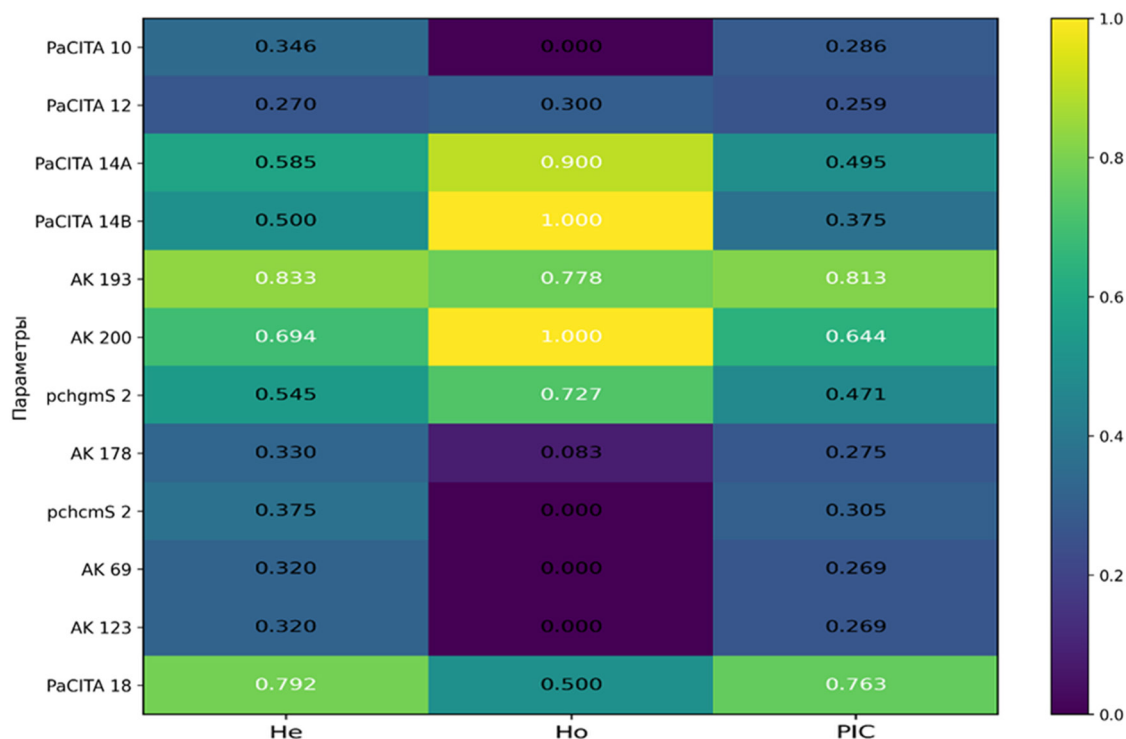


Рис. 5. Тепловая карта генетических параметров SSR-маркеров у исследованных генотипов черешни (*Prunus avium* L.)
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

Индекс полиморфной информативности (PIC) варьировал от 0,259 до 0,813. Наиболее высокие значения PIC были установлены для маркеров AK193 (0,813), AK 200 (0,644) и PaCITA 18 (0,763). Полученные значения свидетельствуют о различной степени информативности использованных SSR-маркеров.

Сравнительная визуализация генетических параметров, рассчитанных для SSR-маркеров, представлена в виде тепловой карты (рис. 5). На тепловой карте маркеры с более высокими значениями He, Ho и PIC отображены более интенсивными цветовыми оттенками. В частности, маркеры AK193, AK 200 и PaCITA 18 характеризовались более высокими значениями показателей генетического разнообразия и информативности по сравнению с рядом других исследованных маркеров.

В целом полученные результаты по SSR-маркерам продемонстрировали наличие генетической вариации среди исследованных генотипов черешни. Используемые SSR-маркеры характеризовались различным уровнем полиморфизма и информативности и позволили провести молекулярную дифференциацию исследованных генотипов и оценить генетическое разнообразие.

Как видно из рис. 5, маркеры AK193, PaCITA18 и AK200 характеризовались более высокими значениями He и PIC по сравнению с большинством других исследованных маркеров. Высокие значения Ho были отмечены для маркеров AK200, PaCITA14B и PaCITA14A. Остальные маркеры демонстрировали более варьирующие значения генетических параметров. Полученные результаты свидетельствуют о различной степени информативности использованных SSR-маркеров и их пригодности для оценки генетического разнообразия исследованных генотипов черешни.

Интегративный морфолого-фенолого-генетический анализ

Сопоставление результатов фенотипической и молекулярно-генетической оценки позволило охарактеризовать исследованные генотипы по комплексу признаков. Сравнительный анализ морфологических показателей показал, что генотипы Тертерского происхождения характеризовались относительно более высокими значениями показателей вегетативного развития, тогда как генотипы Агдашского происхождения демонстрировали более компактные морфологические характеристики.

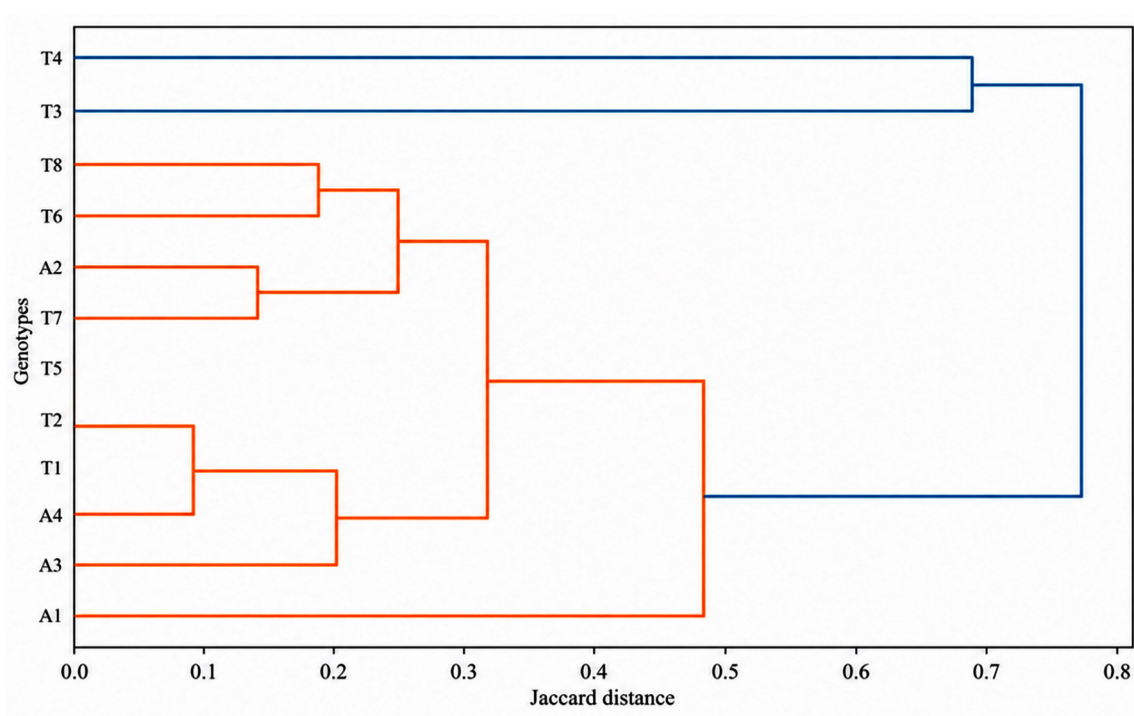


Рис. 6. Дендрограмма генетического сходства 12 образцов *Prunus avium* L., построенная методом UPGMA на основе расстояний Жаккара, рассчитанных по бинарной матрице аллельных профилей SSR-маркеров
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

Сравнительный анализ фенологических показателей показал наличие определенных различий между генотипами по срокам начала вегетационного периода, цветения и созревания плодов.

Молекулярный анализ с использованием SSR-маркеров показал наличие генетического разнообразия среднего уровня среди исследованных генотипов. Для оценки генетического сходства между образцами был проведен кластерный анализ SSR-аллельных профилей с использованием расстояния Жаккара и метода UPGMA. Результаты кластеризации представлены на рис. 6.

Как видно из рис. 6, кластерный анализ SSR-аллельных профилей выявил генетическое сходство и различия между исследованными генотипами. На основе расстояний Жаккара и метода UPGMA образцы были сгруппированы в соответствии с особенностями их аллельных профилей. Полученная дендрограмма отражает генетическое разнообразие исследованного материала и может быть использована для характеристики генетических взаимосвязей между изученными генотипами.

Таким образом, интегративный анализ показал, что совместная оценка морфологических, фенологических и молекулярно-генетических показателей представляет собой

более комплексный подход к характеристике генотипов. Полученные результаты имеют значение для выявления перспективных генотипов, оценки генетических ресурсов и научно обоснованного планирования будущих селекционных программ.

В настоящем исследовании на основе интегративного подхода оценены морфологические, помологические, фенологические и молекулярно-генетические характеристики генотипов черешни (*Prunus avium* L.), собранных в Тертерском и Агдашском районах. Полученные результаты показали, что между генотипами, относящимися к одному виду, существуют определенные различия по вегетативному развитию, качеству плодов, срокам прохождения фенологических фаз и молекулярно-генетическим показателям. Эти результаты согласуются с предыдущими исследованиями, свидетельствующими о наличии высокой фенотипической и генетической изменчивости у генотипов черешни, выращиваемых в различных агро-экологических условиях [1, 10].

Фенологические наблюдения позволили выявить генотипы с ранним и поздним развитием. Раннезацветающие генотипы имеют преимущество с точки зрения более раннего выхода продукции на рынок, однако в районах, где наблюдаются весенние заморозки,

они могут подвергаться более высокому риску повреждения. Напротив, поздноцветущие генотипы считаются более подходящими для регионов с повышенным риском низких температур. Эти результаты согласуются с исследованиями [6] и [9] и подтверждают, что сроки цветения варьируют в зависимости как от генетических особенностей, так и от экологических факторов.

Помологическая оценка показала, что генотипы из Агдашского района отличались более высокой массой плода и мякоти, тогда как генотипы из Тертерского района характеризовались более высоким содержанием общего сахара и несколько большей продолжительностью хранения плодов. Различными авторами отмечено, что наряду с генетическими особенностями важную роль в формировании качества плодов играют условия выращивания и факторы окружающей среды [7, 8]. Выявленные межрайонные различия следует интерпретировать с учетом возможного влияния условий среды, поскольку в настоящем исследовании эффекты генотипа и среды экспериментально не разделялись. В связи с этим комплексная оценка помологических показателей важна для отбора генотипов высокого качества, соответствующих требованиям рынка, в селекционных программах.

Молекулярно-генетический анализ с использованием SSR-маркеров показал наличие генетического разнообразия среди исследуемых генотипов. В частности, SSR-маркеры с высокой информативностью позволили надежно дифференцировать генотипы. Аналогичные результаты по использованию SSR-маркеров для характеристики генетического разнообразия черешни были отмечены в исследовании Акрагов и Karimova [12].

Основным преимуществом исследования является совместная оценка морфологических, помологических, фенологических и молекулярно-генетических показателей в рамках единой аналитической системы. Интеграция фенотипических и молекулярных данных позволила провести комплексную и более объективную оценку генотипов, основанную не только на их внешних признаках, но и на их генетическом потенциале. Такой подход важен для отбора перспективных донорских и родительских форм, сохранения местного генофонда черешни и укрепления научной основы будущих селекционных программ [4, 5, 10]. Следует отметить, что урожайность в рамках настоящего исследования не оценивалась, поэтому данный показатель не включен в сравнительный анализ генотипов.

Заклучение

Проведенная комплексная оценка 12 генотипов черешни (*Prunus avium* L.), собранных в Тертерском и Агдашском районах Азербайджана, выявила значительное фенотипическое и генетическое разнообразие исследуемого материала.

Фенологический анализ показал различия между генотипами по срокам распускания почек, цветения, созревания плодов и продолжительности вегетационного периода. Генотипы Тертерского происхождения в целом характеризовались более ранним прохождением отдельных фаз развития, тогда как генотипы Агдашского происхождения имели более поздние сроки некоторых фенологических процессов.

Морфологическая и помологическая оценка выявила региональные различия по хозяйственно ценным признакам. Генотипы Агдашского происхождения характеризовались более высокой массой плода и массой мякоти, тогда как генотипы Тертерского происхождения отличались более высоким содержанием общего сахара и несколько большей продолжительностью хранения плодов.

Использование 12 SSR-маркеров позволило выявить генетический полиморфизм среди исследованных генотипов. Среднее число аллелей составило 3,50, средняя наблюдаемая гетерозиготность (H_o) – 0,441, средняя ожидаемая гетерозиготность (H_e) – 0,493, а среднее значение индекса полиморфной информативности (PIC) – 0,435.

Интегративный анализ фенотипических и молекулярных данных позволил определить степень сходства между генотипами и выделить перспективный материал для дальнейших селекционных исследований.

Проведенное исследование позволило дать комплексную характеристику генотипов черешни (*Prunus avium* L.), собранных в Тертерском и Агдашском районах Азербайджана, с использованием совокупности морфологических, помологических, фенологических, биохимических и молекулярно-генетических показателей. Полученные результаты подтверждают наличие межрегиональной и внутривидовой вариативности исследуемого материала и демонстрируют эффективность интегративного подхода для оценки местных генетических ресурсов черешни.

Совместное использование фенотипических признаков и SSR-маркеров позволило выявить особенности изученных генотипов и оценить степень их генетического сходства и различий. Полученные данные расширяют представления о генетическом

потенциале местного генофонда черешни и могут служить основой для дальнейшего изучения, сохранения и рационального использования ценных генотипов.

Результаты исследования имеют практическое значение для формирования коллекционного материала, выделения перспективных генотипов и последующего использования ценных форм в селекционных программах, направленных на создание адаптированных и хозяйственно ценных сортов черешни.

Список литературы

1. Xanthopoulou A., Manioudaki M., Bazakos C., Kisdoudis C., Farsakoglou A.-M., Karagiannis E., Michailidis M., Polychroniadou C., Zambounis A., Kazantzis K., Tsafaris A., Madesis P., Aravanopoulos F., Molassiotis A., Ganopoulos I. Whole genome re-sequencing of sweet cherry (*Prunus avium* L.) yields insights into genomic diversity of a fruit species // *Horticulture Research*. 2020. Vol. 7. Art. 60. DOI: 10.1038/s41438-020-0281-9.
2. Wang J., Liu W., Zhu D., Hong P., Zhang S., Xiao S., Tan Y., Chen X., Xu L., Zong X., Zhang L., Wei H., Yuan X., Liu Q. Chromosome-scale genome assembly of sweet cherry (*Prunus avium* L.) cv. Tieton obtained using long-read and Hi-C sequencing // *Horticulture Research*. 2020. Vol. 7. Art. 122. DOI: 10.1038/s41438-020-00343-8.
3. Pinosio S., Marroni F., Zuccolo A., Vitulo N., Mariette S., Sonnante G., Aravanopoulos F. A., Ganopoulos I., Palasciano M., Vidotto M., Magris G., Iezzoni A., Vendramin G. G., Morgante M. A draft genome of sweet cherry (*Prunus avium* L.) reveals genome-wide and local effects of domestication // *The Plant Journal*. 2020. Vol. 103. Is. 4. P. 1420–1432. DOI: 10.1111/tjp.14809.
4. Quero-García J., Branchereau C., Barreneche T., Dirlewanger E. DNA-informed breeding in sweet cherry: Current advances and perspectives // *Italus Hortus*. 2022. Vol. 29. Is. 1. P. 14–37. DOI: 10.26353/j.italhort/2022.1.C2.
5. Quero-García J., Schuster M., López-Ortega G., Charlot G. Sweet cherry varieties and improvement. In: *Cherries: Botany, Production and Uses*; Quero-García J., Iezzoni A., Pulawska J., Lang G., Eds.; CABI: Oxfordshire, UK; Boston, MA, USA, 2017. P. 60–94. DOI: 10.1079/9781780648378.0060.
6. Holusova K., Cmejlova J., Suran P., Cmejla R., Sedlak J., Zeleny L., Bartos J. High-resolution genome-wide association study of a large Czech collection of sweet cherry (*Prunus avium* L.) on fruit maturity and quality traits // *Horticulture Research*. 2023. Vol. 10. Is. 1. Art. uhac233. DOI: 10.1093/hr/uhac233.
7. Ricardo-Rodrigues S., Laranjo M., Agulheiro-Santos A. C. Methods for quality evaluation of sweet cherry // *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2023. Vol. 103. Is. 2. P. 463–478. DOI: 10.1002/jsfa.12144.
8. Mineata I., Murariu O. C., Sirbu S., Tallarita A. V., Caruso G., Jitareanu C. D. Effects of ripening phase and cultivar under sustainable management on fruit quality and antioxidants of sweet cherry // *Horticulturae*. 2024. Vol. 10. Is. 7. Art. 720. DOI: 10.3390/horticulturae10070720.
9. Devasirvatham V., Tan D. K. Y. Key determinants of the physiological and fruit quality traits in sweet cherries and their importance in a breeding programme // *Horticulturae*. 2022. Vol. 8. Is. 8. Art. 694. DOI: 10.3390/horticulturae8080694.
10. Itam M., Jung S., Zheng P., Lee T., Cheng C.-H., Buble K., Main D., Gasic K. Genetic architecture of key traits for *Prunus* crop improvement: an overview of 25 years of curated genomic and breeding data // *Horticulture Research*. 2025. Vol. 12. Is. 8. Art. uhaf142. DOI: 10.1093/hr/uhaf142.
11. Karimova K., Mirzalieva I. Documentation of Sweet Cherry (*Prunus avium* L.) Samples According to the International Descriptors // *International Journal of Innovative Approaches in Agricultural Research*. 2024. Vol. 8. Is. 1. P. 73–84. DOI: 10.29329/ijiaar.2024.1049.2.
12. Akparov Z., Karimova Kh. Molecular evaluation of genetic diversity and genetic analysis of Azerbaijan sweet cherries (*Prunus avium* L.) using capillary electrophoresis with fluorescence-labeled SSR markers // *Journal of Life Sciences and Biomedicine*. 2023. Vol. 5 (78). Is. 2. P. 83–94. DOI: 10.59849/2710-4915.2023.2.83.
13. Schröpfer S., Schuster M., Quero-García J., López-Ortega G., Flachowsky H. Synergistic approach of PCR-based fragment length analysis and amplicon deep sequencing reveals rich diversity of S-alleles in sweet cherries from the Caucasian region of origin // *Frontiers in Plant Science*. 2024. Vol. 15. Art. 1355977. DOI: 10.3389/fpls.2024.1355977.
14. UPOV. Sweet Cherry (*Prunus avium* L.). Guidelines for the Conduct of Tests for Distinctness, Uniformity and Stability. TG/35/7. 2006. Geneva: International Union for the Protection of New Varieties of Plants.
15. Chavoshi M., Watkins C., Oraguzie B., Zhao Y., Iezzoni A., Oraguzie N. Phenotyping protocol of sweet cherry (*Prunus avium* L.) to facilitate an understanding of trait inheritance // *Journal of the American Pomological Society*. 2014. Vol. 68. Is. 3. P. 125–134. DOI: 10.71318/apom.2014.68.3.125.
16. Stegmeir T., Sebolt A., Iezzoni A. et al. Phenotyping protocol for sour cherry (*Prunus cerasus* L.) to enable a better understanding of trait inheritance // *Journal of the American Pomological Society*. 2017. Vol. 68. Is. 1. P. 40–47.
17. Doyle J. J., Doyle J. L. A rapid DNA isolation procedure for small quantities of fresh leaf tissue // *Phytochemical Bulletin*. 1987. Vol. 19. P. 11–15. URL: <https://worldveg.tind.io/record/33886/> [дата обращения: 12.08.2026].
18. Lopes M. S., Sefc K. M., Laimer M., da Câmara Machado A. Identification of microsatellite loci in apricot // *Molecular Ecology Notes*. 2002. Vol. 2. Is. 1. P. 24–26. DOI: 10.1046/j.1471-8286.2002.00132.x.
19. Sosinski B., Gannavarapu M., Hager L. D., Beck L. E., King G. J., Ryder C. D., Rajapakse S., Baird W. V., Ballard R. E., Abbott A. G. Characterization of microsatellite markers in peach [*Prunus persica* (L.) Batsch] // *Theoretical and Applied Genetics*. 2000. Vol. 101. Is. 3. P. 421–428. DOI: 10.1007/s001220051499.
20. Köse M. A., Çetinsay N., Gürcan K. De novo transcriptome assembly and SSR marker development in apricot (*Prunus armeniaca*) // *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*. 2017. Vol. 41. Is. 4. P. 305–315. DOI: 10.3906/tar-1705-105.
21. Schuelke M. An economic method for the fluorescent labelling of PCR fragments // *Nature Biotechnology*. 2000. Vol. 18. Is. 2. P. 233–234. DOI: 10.1038/72708.
22. R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2023. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.r-project.org/> [дата обращения: 12.08.2026].

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование: Автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

СТАТЬИ

УДК 911.3:316.334.52
DOI 10.17513/use.38544



CC BY 4.0

СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И СОЦИОКУЛЬТУРНЫЕ УСЛОВИЯ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗВИТИЯ ТЕРРИТОРИИ

Ардашев Р. Г. ORCID ID 0000-0002-2286-8711

Федеральное государственное казенное образовательное учреждение высшего образования «Восточно-Сибирский институт Министерства внутренних дел Российской Федерации», Иркутск, Российская Федерация, e-mail: ardashev.rg@bk.ru

Геопространственные особенности развития опираются на социально-экономические и социокультурные условия. В статье рассматривается территория Байкальского региона как пример соединения разных условий, позволяющих создать ресурсный потенциал развития человеческого капитала и социального моделирования развития территориального развития. Цель исследования – проанализировать особенности социально-экономического и социокультурного развития Байкальского региона (Иркутской области, Забайкальского края и Республики Бурятия). В результате качественного исследования, проведенного методом экспертного интервью среди 36 экспертов, занимающихся геопространственным развитием Иркутской области, Забайкальского края и Республики Бурятия, были выделены уникальные черты и универсальные характеристики геопространственного развития территории. К универсальным сферам отнесли экологическую среду, инновационное экотехнологическое производство, интеллектуально-образовательный показатель и инфраструктурный потенциал. К уникальным сферам отнесли: социокультурный и исторический контекст, ментальные особенности, психологическую специфику, символический образ. Эксперты по 10-балльной шкале оценили перспективы развития выделенных сфер с 1800 г. и по наши дни, это позволило выделить временную динамику трансформации геопространственных универсальных условий развития территории в разные исторические периоды, а также подчеркнуть условную стабильность развития уникальных сфер, укрепляющих геопространственный потенциал территории. Сделан вывод о том, что Байкальский регион может восприниматься основой для моделирования развития территории на основе глобальных задач развития технологий и инфраструктуры будущего и социокультурного контекста и преемственности поколений прошлого и настоящего.

Ключевые слова: геопространство, социокультурные условия, социально-экономические условия, факторы трансформации, человеческий потенциал

SOCIO-ECONOMIC AND SOCIOCULTURAL CONDITIONS OF GEO-SPATIAL DEVELOPMENT OF THE TERRITORY

Ardashev R. G. ORCID ID 0000-0002-2286-8711

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
“East Siberian Institute of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation”,
Irkutsk, Russian Federation, e-mail: ardashev.rg@bk.ru*

Geo-spatial development characteristics are based on socio-economic and socio-cultural conditions. This article examines the Baikal region as an example of the combination of various conditions that enable the creation of resource potential for human capital development and social modeling of territorial development. The aim of the study is to analyze the characteristics of the socio-economic and socio-cultural development of the Baikal region (Irkutsk Oblast, Zabaykalsky Krai, and the Republic of Buryatia). A qualitative study conducted through expert interviews with 36 experts working on geo-spatial development in the Irkutsk Region, Zabaykalsky Krai, and the Republic of Buryatia identified unique features and universal characteristics of the region's geo-spatial development. Universal areas included the ecological environment, innovative eco-technological production, intellectual and educational indicators, and infrastructural potential. Unique areas included the socio-cultural and historical context, mental characteristics, psychological specifics, and symbolic image. Experts assessed the development prospects of the identified areas on a 10-point scale from the 18th century to the present day. Experts evaluated the development prospects of specific sectors from 1800 to the present day on a ten-point scale; this analysis made it possible to trace the temporal dynamics of how the universal geospatial conditions for the territory's development transformed across different historical periods, while also highlighting the relative stability of the unique sectors that bolster the territory's geospatial potential. The study concludes that the Baikal region can serve as a foundation for modeling territorial development, integrating global objectives regarding future technology and infrastructure with the sociocultural context and the continuity between past and present generations.

Keywords: geo-space, socio-cultural conditions, socio-economic conditions, transformation factors, human potential

Введение

Развитие любой территории происходит через пересечение разнообразных направлений, формирующих общее поле уникального социального контекста, который влия-

ет на человеческий капитал региона, формирует социальные ресурсы для развития настоящего и будущего. Геопространство позволяет объединить в себе разнообразные направления моделирования любой

территории: от социальных до природных, от политических до экономических, от культурных до производственных, от сельскохозяйственных до религиозных. Эти связи определяют уникальные черты любой территории.

Человеческий потенциал формируется через сохранение наследия прошлого в личной жизненной истории и истории семьи (социокультурный контекст) и возможности личного и группового общественного развития, через материальные (работа, возможности организации быта) и социальные (статусные) притязания (социально-экономический контекст). Геопространство тем самым формируется через объективные условия и субъективные возможности для социокультурного и социально-экономического развития человека, семьи, сообщества. В разных регионах эти процессы отличаются, поэтому формируется уникальный геопространственный образ территории.

В литературе рассматривается уникальный симбиоз связи природных, социальных и культурных контекстов и факторов, способствующих развитию уникального пространства, где эволюционируют люди и общество в целом. Примером могут служить исследования: адаптации в социальной и природной среде А. А. Артеменкова [1], коэволюции природы и социокультурной реальности П. М. Бурак [2, 3]. Вопросы сохранения человеческого в человеке и природе Н. В. Комовой, В. В. Гусаренко и Д. А. Ноздрина [4], биосферы и социальной реальности Г. В. Осипова [5]. Отдельным направлением выступают работы о сохранении человечества А. Н. Тетиор [6], о представлениях человека о природной среде Ю. Л. Ткаченко, М. В. Комиссарова и М. А. Швед [7] и пр.

Работы данных авторов позволяют выделять локальные природно-географические и социокультурно-исторические территории, фиксирующие уникальные коды жителей, определяющие ментальное восприятие себя и окружающего мира. Это позволило выделить нам один из базовых аспектов фиксации уникальности исследуемых территорий.

Стоит выделить идеи Льва Гумилева, рассматривающего пассионарные условия развития человека, его моральных ценностей и ориентиров, связанные с конкретной территорией и объединяющие людей с определенными взглядами и ценности на данных территориях, раскрываются в работах Л. Г. Фишмана [8], В. А. Шнирельмана [9] и др. А также особенности трансформации

мышления, изученные в более ранних работах автора данной статьи [10, 11].

Подход данных исследователей фиксирует внимание на роли личности в развитии территориального потенциала. Что также стало особым фокусом наших интересов в ходе проведения эмпирической части исследования и позволило определить зависимость личности и исторического контекста в развитии территорий.

Вопросы изучения уникального геокультурного образа территории, ее имиджа анализируются в трудах Т. А. Волковой, В. Э. Иващенко и В. В. Анисимовой [12], Ю. В. Завариной [13, 14]. Отдельно изучаются вопросы экологии и патриотизма в исследованиях Р. В. Иванова [15, 16], исследование особенностей территориальной идентичности граждан проводит О. А. Полюшкевич [17, 18]. На уровне социального взаимодействия общественных институтов и межсекторного партнерства некоммерческих организаций П. А. Трескина [19, 20].

Данный блок работ определил такой аспект исследования, который отвечает за взаимодействие личности и социальных институтов на конкретной территории, формирования уникальных социально-пространственных связей, влияющих на логику развития региона. Это позволило нам сформировать общую логику исследования геопространственного потенциала территории. Указанные подходы и отдельные идеи рассматриваемых авторов позволяют фиксировать разнообразные условия воздействия на уникальную геопространственную систему территориального потенциала любого государства. Поэтому могут быть рассмотрены интересы с позиции учета стратегических ориентиров территориального развития.

Цель исследования – проанализировать особенности социально-экономического и социокультурного развития Байкальского региона (Иркутской области, Забайкальского края и Республики Бурятия).

Материалы и методы исследования

Нами был выбран Байкальский регион как объект внимания из-за уникального географического расположения – вокруг озера Байкал. Эта пространственная особенность становится точкой притяжения и формирования особых экономических, социальных, культурных, политических связей. При этом каждая территория обладает своим уникальным потенциалом, ресурсами и перспективами развития.

Методом исследования стало экспертное интервью (проводилось с июля 2025 г. по июль 2026 г.), среди людей, занимающихся изучением и развитием каждого субъекта рассматриваемого региона (депутаты, научные исследователи, преподаватели вузов, чиновники, журналисты, руководители краевых общественных организаций, писатели, предприниматели). Разнообразные эксперты были выбраны потому, что они позволяют всесторонне оценить универсальные черты социально-экономического и социокультурного развития Иркутской области, Забайкальского края и Республики Бурятия и в то же время увидеть уникальные характеристики и условия развития всего региона. Всего в исследовании участвовало 36 чел. (по 12 из каждого субъекта), 20 женщин (56 %) и 16 мужчин (44 %) в возрасте от 30 до 65 лет, каждый из них занимался геопространственными интересами региона 5 и более лет. Выбор экспертов позволяет формировать общее понимание геопространственного потенциала анализируемого региона. Общий контекст понимания условий и ориентиров развития территории позволяет говорить об уникальных смыслах и формах территориального развития, а также подчеркнуть представления самих экспертов (занимающих разные значимые общественные сферы жизни) о развитии территории.

Каждое интервью длилось от 1,5 до 2 ч. Ответы экспертов транскрибировались и анализировались в программе Atlas.ti, отдельно проводился контент-анализ полученных текстов¹.

Экспертное интервью проводилось по следующим блокам тем:

Как вы понимаете термин «геопространство региона»? По каким критериям и/или условиям оно формируется?

Какие элементы «геопространства региона» можно назвать универсальными, а какие уникальными? Что выступает уникальным, а что универсальным элементом Байкальского региона?

Что составляет ресурсы, механизмы и инструменты для формирования уникального геопространственного потенциала?

Какие сферы универсальных показателей геопространственного развития Байкальского региона вы могли бы назвать? Вы могли бы выделить периоды развития разных сфер и дать их общую характеристику? Оцените выделенные сферы в разные периоды (обозначив сами периоды) по шкале от 1 до 10, где 1 – минимальный уровень, 10 – максимальный уровень.

Дайте общий анализ геопространственного развития Байкальского региона.

Результаты исследования и их обсуждение

Геопространственные особенности отмечаются всеми экспертами как ключевые моменты фиксации территории среди других регионов России. Благодаря природному фактору образования данного региона, озеру Байкал, формируются общие рамки развития, важные не только для России, но и для других стран.

Ключевым универсальным показателем развития геопространственных условий выступает экологическая среда. Экспертами она формируется как *необходимость сохранения крупнейшего пресного озера мира* (респондент 1, преподаватель), как *место редких эндемиков* (респондент 2, научный сотрудник), как *экологический маркер становления территории от древности до наших дней* (респондент 3, депутат). Это то, что уже является природным естественным хранилищем человечества, а также то, что в перспективе может помочь выжить человечеству.

Сюда же включается развитие экологически безопасного производства на территории Байкальского региона, так как это выступает не просто инструментом *резервации уникальных территорий, но и позволяет создавать уникальные технологии, способные сохранить природу и выдать инновационные технологические продукты* (респондент 4, предприниматель). *Инновационное развитие Байкальского региона – это необходимый компромисс между природой и экономикой, без него – нет развития* (респондент 5, депутат). Необходимость учета экотехнологий, развитие инновационных производств нового поколения – условие социально-экономического геопространственного развития региона.

Интеллектуально-образовательный показатель отражает основу и перспективы человеческого капитала региона. По мнению экспертов, он включает вопросы демографии и миграции. На данный момент ситуация достаточно печальная: рождаемость не позволяет воспроизводить региональные потребности. Молодежь стремится переехать в центр или более западные регионы для учебы и работы. Воспроизводство населения частично опирается на мигрантов из стран СНГ, но уровень образования их достаточно низок, что указывает на снижение интеллектуально потенциала региона в будущем.

¹ Здесь и далее цитаты выделены курсивом.

Таблица 1

Динамика изменения универсальных показателей
геопространственного развития Байкальского региона

Сферы	1800– 1861 гг.	1862– 1917 гг.	1918– 1940 гг.	1941– 1970 гг.	1971– 1990 гг.	1991– 2000 гг.	2001– 2026 гг.
Экологическая среда	8,3	8,2	7,5	4,5	4,1	5,2	6,3
Инновационное экотехнологическое производство	1,2	1,4	1,6	3,4	4,2	5,2	6,2
Интеллектуально- образовательный показатель	2,3	3,4	4,5	8,9	9,4	8,2	6,5
Инфраструктурный потенциал	1,2	2,1	4,3	9,8	8,7	8,5	7,7

Примечание: составлена автором по результатам анализа экспертного интервью, где просили оценить выделенные сферы в разные периоды по шкале от 1 до 10, где 1 – минимальный уровень, 10 – максимальный уровень.

Люди бегут за лучшей жизнью, большими зарплатами, лучшим образованием, большим выбором рабочих мест. Если они будут видеть эти возможности у себя на Родине, то никуда не поедут (респондент 6, предприниматель). Для восстановления человеческих ресурсов Байкальского региона необходимы социально-экономические меры стимулирования населения, чтобы были *пониженная ставка ипотеки* (респондент 7, преподаватель вуза), *гарантированная занятость выпускников вузов и колледжей* (респондент 8, преподаватель вуза), *возможности организации качественной жизни на территории Байкальского региона* (респондент 9, руководитель некоммерческой организации).

Также был обозначен инфраструктурный показатель развития территории. Он касался как дорожно-транспортных, логистических условий (качественные дороги, наличие доступного транспорта и т. д.), так и качества жизни в населенных пунктах (начиная от обеспеченности учреждений социальной сферы (больницы, школы, детские сады, досуговые центры и пр.), заканчивая возможностями личностного и профессионального роста (обучение, спорт, хобби). Эксперты обозначали это через проблемные разнообразные зоны: *без достойных условий жизни для себя и семьи – нет возможности для того, чтобы оставаться на местах и развивать регион* (респондент 10, писатель), *социальная инфраструктура и рабочие места – основа того, что будет держать человека на территории; жить в условиях постоянных ограничений в доступе к базовым условиям жизни не по-*

вышает мотивацию и желание что-либо делать на благо региона (респондент 4, предприниматель).

Таким образом, универсальные черты геопространственного развития формируются через инновационное развитие тех ресурсов, что уже имеются на рассматриваемой территории. Экологическая повестка выступает основой для развития науки, производства, экономики, а также позволяет учитывать особенности социальной сферы. Перспективой социального развития служат механизмы воспроизводства социально-ресурсного потенциала региона. В табл. 1 показана динамика изменения универсальных показателей геопространственного развития с 1800 г. по настоящее время (сбор данных завершился в июле 2026 г.)². Периоды, выделенные для анализа экспертами, определялись через ключевые события, характеризующие те или иные социально-экономические, политические, географические изменения в жизни страны.

В результате анализа экспертных оценок можно говорить о том, что экологическая среда в XIX в. и в начале XX в. на рассматриваемых территориях была более благополучной, в силу того, что особого загрязнения не было, при наличии производств, добыче ископаемых, вырубке лесов воздействие на природу, на геопространственный потенциал было несравнимо меньше, чем

² Данные табл. 1 и 2 представляют собой результаты авторского кодирования интервью, которые строились из частоты упоминания четырех тем в разные промежутки времени, о чем говорили эксперты во время интервью. Критерии балла формировались по средним показателям частоты упоминания того или иного периода.

с середины XX в. и по наши дни. Инновационное эко-технологическое производство в XIX в., возможно, и было более экологическим, но менее технологически развитым, что не позволяет корректно сравнивать показатели. Но и перспектива изменения за XX в. и начало XXI в. показывает общую динамику развития. Интеллектуальный потенциал значительно обогатился в середине XIX в. и в целом повлиял на уровень образования и культуры Иркутской области, Забайкальского края, Республики Бурятия за счет декабристов, но их было несравнимо меньше, чем основного, менее образованного населения рассматриваемых территорий. Изменения начались после революции 1917 г., и в послевоенные годы произошел еще более активный рывок в образовательном и интеллектуальном потенциале за счет приезжих с западных территорий, переезда эвакуированных предприятий, развития местных научных и практических школ, научных институтов и пр., что дало импульс к качественному росту данного показателя. Но он с 1991 г. постепенно снижается за счет миграции более молодых и перспективных, интеллектуально развитых жителей. Схожие тенденции наблюдаются при анализе инфраструктурного развития регионального потенциала: максимальный пик – советское время, когда осваивались территории, строились новые города, дороги, обеспечивалась вся социальная и технологическая инфраструктура, которая позволяла достойно жить на анализируемых территориях.

После 1991 г. не построен ни один город на территории Иркутской области, Забайкальского края и Республики Бурятия, мы пользуемся тем, что построили во время СССР. Поэтому этот показатель не развивается, но медленно понижается его проработанность. Стоит признать, что инфраструктурное развитие городов, рассматриваемых территорий осуществлялось, но темы освоения и развития замедлились по сравнению с советским периодом. Уникальные черты развития Байкальского региона определены его прошлым и возможностями активизации памяти поколений в развитии его настоящего и будущего.

Отдельно фиксировался социокультурный и исторический контекст развития геопространственных возможностей Байкальского региона. Опыт прошлого, который формирует особые уникальные условия в настоящем, определяет то, какие условия и возможности регионального развития

мы можем сегодня наблюдать. Эксперты говорили об этом факторе следующим образом: *уникальные жизненные обстоятельства, которые объединяют между собой жителей региона, формируют историческую память и социальную солидарность жителей* (респондент 12, писатель), *территориальная идентичность жителей Байкальского региона строится на особых условиях обеспечения жизни на данной территории в прошлом, это то, что формирует преемственность поколений и связывает жителей между собой навсегда* (респондент 13, руководитель общественной организации).

Менталитет жителей Байкальского региона формируется через исторический и социокультурный опыт, способы адаптации к вызовам прошлого и настоящего, который отражается в особых представлениях и установках, мировоззрении, которое соединяет опыт коренных народов и пришлых, кто осваивал территории с момента открытия и до современности. Эксперты особо выделяли ментальные черты жителей: *ты всегда почувствуешь родного человека с байкальской земли – это незримые социальные связи, которые пропитаны духом места, это то, что позволяет выделять своих из толпы* (респондент 14, журналист), *менталитет жителей особый, он строится в особенности фраз, специфике быта и условий повседневного обихода, менталитет – это дух людей определенной территории, который формирует особые мысли и чувства и влияет на поведение; жители одного или другого берега Байкала обладают уникальными чертами, позволяющими их выделять на фоне других народов* (респондент 15, преподаватель вуза).

Байкальская экотерритория влияет на психологические особенности людей, формируя особый характер, связанный с мировоззрением и ценностями и взглядами на свою жизнь и жизнь всего общества. Эксперты говорили об уникальных психологических чертах жителей региона таким образом: *психология Байкала – это естественная терапия души, которая необходима всем, кто может и хочет сбросить груз проблем и найти внутренний покой* (респондент 16, руководитель краевой общественной организации), *психологические черты местных жителей формируются постепенно, но обладают внутренней силой и готовностью размеренно решать любые проблемы, не замечая преград и препятствий* (респондент 17, депутат).

Таблица 2

Динамика изменения уникальных показателей
геопространственного развития Байкальского региона

Сферы	1800– 1861 гг.	1862– 1917 гг.	1918– 1940 гг.	1941– 1970 гг.	1971– 1990 гг.	1991– 2000 гг.	2001– 2026 гг.
Социокультурный и исторический контекст	6,5	6,3	6,8	7,3	7,1	6,5	6,2
Ментальные особенности	4,6	5,5	5,9	6,4	6,5	5,9	6,2
Психологическая специфика	4,3	4,7	4,9	5,2	5,3	4,7	5,1
Символический образ	6,7	7,8	8,8	8,4	8,1	7,5	7,1

Примечание: составлена автором по результатам анализа экспертного интервью, где просили оценить выделенные сферы в разные периоды по шкале от 1 до 10, где 1 – минимальный уровень, 10 – максимальный уровень.

Еще одной уникальной чертой выступает символический образ Байкальского региона. Он формируется через сакральные смыслы социокультурных и традиционных образов, ментальные и психологические черты, которые находят отражение в символической структуре мира жителей региона. Эксперты его обозначали следующим образом: *Иркутск – середина земли* (респондент 5, депутат), *Байкал – место силы духа всех жителей Сибири* (респондент 14, журналист), *шаманы Байкала – это целители душ всего человечества* (респондент 10, писатель). То есть эксперты наделяли место и живущих на нем людей как тех, кто обладает особой миссией, у кого свой путь, важный как для них самих, так и для их народа и всего человечества. Своего рода мессианская идея спасения.

Выделенные уникальные черты формируют особую территориальную идентичность и социальную солидарность жителей, образуя такие связи между собой и территорией, что укрепляют единство геопространственного развития через опыт прошлого, смыслы настоящего и инновационные возможности и надежды будущего. В табл. 2 показаны изменения уникальных показателей геопространственного развития Байкальского региона.

Уникальные черты более стабильно развиваются с момента более интенсивного освоения Байкальского региона до настоящего времени. Отдельные изменения зависели от идеологических задач и политических решений. Но все же это не стало преградой для сохранения уникального геопространственного потенциала региона. Полагаем, что это стало возможно благодаря естественной точке объединения этого региона – озеру Байкал. По мнению автора, то, что эксперты более высоко оценивали

символический образ территории, говорит о том, что все остальные факторы его укрепляют и в том или ином случае являются его элементами.

Выделенные экспертами сферы определяют то, что влияло и на универсальные показатели, и то, что позволило сохранить уникальные черты, определяющие геопространственный потенциал Байкальского региона. В своем объединении это формирует уникальный облик Байкальского региона. Также именно это позволяет говорить о развитии данной территории, с учетом инновационно-технологического развития в будущем и сохранения социокультурного наследия и преемственности поколений прошлого и настоящего.

Заключение

Сформулированные экспертами общие универсальные условия геопространственного развития сводятся к моделированию ресурсного развития через природно-производственные особенности, определенные территорией; инфраструктурный потенциал и перспективы развития; а также формы социально-технологического и инновационного освоения территории. Это то, что может стать стратегическим преимуществом как на уровне внутригосударственного развития (перспективы Байкальского региона на фоне других территорий), так и на международном уровне (через ресурсы геополитики и экономического развития мира).

Также определенные уникальные черты Байкальского региона формируются особым пересечением исторических, религиозных и социокультурных традиций и норм прошлого и настоящего, которые уже сформировали уникальный менталитет территории. Именно он формирует уникальный имидж региона, способный привлекать как

на личном уровне (например, расширение туристических возможностей региона), так и на уровне компаний (формирование новых предприятий или организации филиалов более крупных компаний). Благодаря уникальным чертам конструируется человеческий капитал региона и условия его развития, с учетом геопространственных возможностей и перспектив.

Список литературы

1. Артеменков А. А. Дезадаптогенез в антропофере: естественно-научное и философское осмысление проблемы // Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Сер.: Гуманит. и соц. науки. 2019. № 5. С. 91–101. DOI: 10.17238/issn2227-6564.2019.5.91 EDN: DLYENQ.
2. Бурак П. М. Инварианты коэволюции и их взаимосвязь в природе и социокультурной реальности // Труды БГТУ. Серия 6: История, философия. 2017. № 2 (203). С. 51–56. EDN: YLMAXL.
3. Бурак П. М. Коэволюция и ноосфера в панораме актуальных исследований: краткий обзор // Труды БГТУ. Серия 6: История, философия. 2018. № 2 (215). С. 71–80. EDN: YPTTUD.
4. Комова Н. В., Гусаренко В. В., Ноздрин Д. А. О сохранении человеческого в человеке и природного в природе // Философия образования. 2015. № 2 (59). С. 93–104. EDN: TQBFWB.
5. Осипов Г. В. Биосфера, социальная реальность и социально-гуманитарное знание // Биосфера. 2009. № 1. С. 111–116. EDN: QZOGEL.
6. Тетиор А. Н. О сохранении человечества // Евразийский Союз Ученых. 2016. № 2–4 (23). С. 137–140. EDN: XCRANT.
7. Ткаченко Ю. Л., Комиссарова М. В., Швед М. А. Представления человека о природной среде и философский аспект преодоления мирового экологического кризиса // Общество: философия, история, культура. 2018. № 1. С. 28–36. DOI: 10.24158/fik.2018.1.5. EDN: YLLTBO.
8. Фишман Л. Г. Лев Гумилев как зеркало морального перелома // Дискурс-Пи. 2019. № 4 (37). С. 49–60. DOI: 10.24411/1817-9568-2019-10403. EDN: QAZWCH.
9. Шнирельман В. А. Лев Гумилев: от пассионарного напряжения до несовместимости культур // Евразия: духовные традиции народов. 2013. № 3–4. С. 131–141. EDN: DXOFKJ.
10. Ардашев Р. Г. Геопространственная трансформация мировоззрения современников // Социология. 2026. № 6. С. 8–12. EDN: DACBLX.
11. Ардашев Р. Г. Феноменология рационального и иррационального мышления // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Философия. Психология. Педагогика. 2021. Т. 21. № 2. С. 120–124. DOI: 10.18500/1819-7671-2021-21-2-120-124. EDN: WMOGED.
12. Волкова Т. А., Иващенко В. Э., Анисимова В. В. Методологические основы формирования универсальной модели геокультурного образа территории // Московский экономический журнал. 2026. Т. 11. № 7. С. 76–90. DOI: 10.55186/2413046X_2026_11_7_95. EDN: CFGCZF.
13. Заварзина Ю. В. Имидж территории через призму социокультурных коммуникаций // Социология. 2021. № 4. С. 75–91. EDN: HPVFKF.
14. Заварзина Ю. В. Благоустройство территории в оценках общественного мнения // Социология. 2024. № 2. С. 100–112. EDN: KSPASF.
15. Иванов Р. В. Проблемы формирования экологического сознания как основы патриотизма на территории Байкальского экорегиона // Социология. 2024. № 11. С. 40–44. EDN: WCSEER.
16. Иванов Р. В. Экологический патриотизм в Байкальском регионе: перспектива развития экорегиона // Социология. 2024. № 10. С. 39–43. EDN: HSITLU.
17. Полошкевич О. А. Символическое конструирование территориальной идентичности (на примере топонимики Иркутска) // Управленческое консультирование. 2017. № 11 (107). С. 80–94. DOI: 10.22394/1726-1139-2017-11-80-94 EDN: YMAQMH.
18. Полошкевич О. А. Территориально-пространственные символы социокультурной солидарности Сибири // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2017. № 4 (47). С. 293–300. EDN: YPIGSU.
19. Трескин П. А. Роль некоммерческих организаций в социально-политическом пространстве Байкальского региона // Социология. 2018. № 2. С. 131–137. EDN: VUTOWI.
20. Трескин П. А. Участие общественных организаций в регулировании общественных отношений в регионе // Социология. 2020. № 1. С. 352–357. EDN: PQKGCD.

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование: Автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.



РАЗВИТИЕ ТЕРРИТОРИАЛЬНОЙ РЕКРЕАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ НА ОЗЕРЕ ЭБЕЙТЫ (ОМСКАЯ ОБЛАСТЬ)

¹Демешко В. Н. ORCID ID 0000-0002-0071-1019,

²Кацнель С. А. ORCID ID 0000-0002-3306-3281,

²Кулагина Е. В. ORCID ID 0000-0002-9328-4385,

²Солодовникова Ю. Р. ORCID ID 0000-0001-9842-3295,

²Лукина О. В. ORCID ID 0000-0003-3429-1718

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Омский государственный педагогический университет», Омск, Российская Федерация,
e-mail: demits@rambler.ru;

² Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Омский государственный технический университет», Омск, Российская Федерация

Вопросы рекреации и развития внутреннего туризма являются актуальными, особенно для территорий с преобладающим городским населением и значительно удаленных от пляжных курортов. Сформировавшиеся в регионах территориальные рекреационные системы решают вопросы туризма и рекреации россиян на местах. На пути к становлению в качестве востребованной для регионального туризма Омской области территориальной рекреационной системы находится озеро Эбейты, имеющее природоохранный статус государственного природного комплексного заказника регионального значения. Целью статьи является анализ ресурсов озера Эбейты как потенциальной территориальной рекреационной системы и предложения о развитии её основных элементов. Экспедиционные научные наблюдения, проведенные авторами в мае 2025 г., показали, что озеро Эбейты может стать полноценной территориальной рекреационной системой, так как его природная уникальность сочетается со значительным рекреационным потенциалом. На сегодняшний день территориальная рекреационная система озера Эбейты находится в процессе становления, причем некоторые присущие ей подсистемы представлены лишь частично (инфраструктурная, потребительская, рекреационно-деятельностная, кадровая, организационно-управленческая), а некоторые (например, природно-рекреационная) уже полностью сложились. При этом предпосылки развития территории определяются не только естественными природными ландшафтами, но и большой заинтересованностью в этом местных органов власти. Всё это в совокупности создаёт возможность развивать здесь бальнеологический, экскурсионный, экологический, этнографический и научный туризм.

Ключевые слова: особо охраняемые природные территории, территориальная рекреационная система, бальнеология, Омская область, озеро Эбейты, туризм

DEVELOPMENT OF THE TERRITORIAL RECREATIONAL SYSTEM ON LAKE EBEITY (OMSK REGION)

¹Demeshko V. N. ORCID ID 0000-0002-0071-1019,

²Katsiel S. A. ORCID ID 0000-0002-3306-3281,

²Kulagina E. V. ORCID ID 0000-0002-9328-4385,

²Solodovnikova Y. R. ORCID ID 0000-0001-9842-3295,

²Lukina O. V. ORCID ID 0000-0003-3429-1718

¹ Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«Omsk State Pedagogical University», Omsk, Russian Federation,
e-mail: demits@rambler.ru;

² Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education
«Omsk State Technical University», Omsk, Russian Federation

Issues of recreation and the development of domestic tourism are relevant, especially for areas with a predominant urban population and significantly remote from beach resorts. The territorial recreational systems formed in the regions solve the issues of tourism and recreation of Russians on the ground. On the way to becoming a territorial recreational system in demand for regional tourism in the Omsk Region, Lake Ebeity is located, which has the environmental status of a state nature complex reserve of regional significance. The purpose of the article is to analyze the resources of Lake Ebeity as a potential territorial recreational system and to propose the development of its main elements. Expeditionary scientific observations carried out by the authors in May 2025 showed that Lake Ebeity can become a full-fledged territorial recreational system, since its natural uniqueness is combined with significant recreational potential. Today, the territorial recreational system of Lake Ebeity is in the process of formation, and some of its inherent subsystems are only partially represented (infrastructure, consumer, recreational, personnel, organizational and managerial), and some (for example, natural and recreational) have already fully developed. At the same time, the prerequisites for the development of the territory are determined not only by natural landscapes, but also by the great interest of local authorities in this. All this together creates an opportunity to develop balneological, excursion, ecological, ethnographic and scientific tourism here.

Keywords: specially protected natural areas, territorial recreational system, balneology, Omsk region, Lake Ebeity, tourism

Введение

Омская область – это Западно-Сибирский регион Российской Федерации с численностью населения в 1,8 млн чел., в котором более 1,3 млн чел. проживает в городской среде. Это делает особо актуальными вопросы рекреации и туризма.

Наиболее эффективной формой организации туристско-рекреационного пространства являются территориальные рекреационные системы (ТРС). Они включают в себя всё необходимое для качественного обслуживания отдыхающих и для туристско-рекреационного проектирования. Одним из критериев сформировавшейся ТРС выступает разнообразие форм рекреационной деятельности и видов туризма. Основанием для этого является сочетание рекреационных ресурсов, хорошо изученных и активно вовлекаемых в сферу повседневного отдыха. В Омской области примером такой ТРС является Красноярско-Чернолученская курортная зона местного значения [1].

На пути к становлению в качестве полноценной и востребованной для регионального туризма ТРС находится озеро Эбейты. Этот гидрологический природный объект расположен в юго-западной части Омской области, в 100 км от областного центра и в 25 км от границы с Республикой Казахстан. Эбейты является одной из наиболее значимых особо охраняемых природных территорий (ООПТ) и с 2012 г. имеет статус государственного природного комплексного заказника регионального значения. Одновременно с этим озеро Эбейты – важнейшая точка притяжения туристов в юго-западной части региона. Отдыхающих здесь привлекает необычный, открытый пейзаж, сочетающий самое большое по размерам в области горько-солёное озеро и его обширную котловину, занятую галофитными степными растительными сообществами. Пелоиды озера выступают в качестве дополнительного фактора его аттрактивности.

Прибрежная зона озера перспективна для функционального зонирования и туристско-рекреационного проектирования [2].

Развитие рекреационной инфраструктуры вблизи озера позволит сохранить не только устойчивый туристский поток, но и уникальные экологические свойства его природного комплекса. Конечной целью такого развития может стать ТРС, некоторые элементы которой уже сформировались. Такая система способна, с одной стороны, нивелировать отрицательные последствия туристско-рекреационной деятельности, а с другой – обеспечить рациональное использование природно-рекреационных ресурсов и сделать экологически ориентированным весь характер природопользования на озере Эбейты.

Цель исследования – рассмотреть озеро Эбейты как потенциальную ТРС и внести предложения о развитии её основных элементов.

Материалы и методы исследования

Исследование проводилось с применением территориального и исторического подходов.

Полевые исследования и наблюдения на озере Эбейты велись 20 и 25 мая 2025 г. в основных точках посещения озера туристами и рекреантами. Координаты точек представлены в таблице 1. Фотофиксацией регистрировался прилегающий к озеру ландшафт и фрагменты сохранившейся инфраструктуры.

Информационной основой для исследования послужили: научная литература, картографические материалы, результаты полевых исследований и наблюдений. Для реализации поставленной цели были использованы методы научного описания, сравнения, обобщения и системного анализа.

Результаты исследования и их обсуждение

Озеро Эбейты – крупнейшее из горько-солёных озёр Омской области. По размерам оно занимает четвёртое место среди всех озёр региона. Его площадь колеблется от 63 до 85 км². Длина озера варьирует от 12 до 13,5 км, ширина от 7 до 11,5 км, длина береговой линии составляет в среднем 34 км [3, с. 112].

Таблица 1

Географические координаты точек наблюдения на озере Эбейты

Блилежащий населённый пункт	Административный район	Географические координаты	
		Широта	Долгота
Красногорка	Полтавский	54,590227	71,72633
Ксеньевка	Исилькульский	54,687536	71,686816
Тумба	Москаленский	54,701953	71,74625

Примечание: составлено авторами.

Озеро Эбейты является одним из наиболее значимых гидрологических и туристско-экскурсионных объектов.

Котловина находится в пределах Ишимской неоген-четвертичной денудационно-аккумулятивной равнины. Абсолютная высота составляет 54 м над уровнем моря. Вокруг озера на значительном удалении друг от друга расположено шесть сельских населённых пунктов, относящихся к трём административным районам: Москаленскому, Полтавскому и Исилькульскому. Общую форму озера можно считать эллиптической. Береговая линия изрезана слабо. Единственный небольшой залив («лагуна», устаревшее название – Сагский) расположен в восточной части. Озеро Эбейты – бессточное, его питание смешанное (дождевое и снеговое). Этим обусловлены значительные колебания площади. Солёность в среднем составляет 250‰. Озеро неглубокое, его глубина колеблется от 0,3 до 1,6 м. Дно плоское, ровное и представляет собой солевой пласт толщиной до 8 см, под которым находится залежь пелоидов. Единственный обитатель озера – солелюбивый рачок *Artemia salina*. Высокая солёность обусловила преобладание в котловине галофитной растительности [4] и наличие редких растительных сообществ, занесённых в Красную книгу Омской области [5, с. 61].

Комплексное нарушение земель в его котловине и случаи браконьерства рачка *Artemia salina* актуализировали проблемы рационального природопользования. Постановлением Правительства Омской области № 110-п от 17.05.2012 озеро Эбейты получило статус государственного природного комплексного заказника регионального значения. Цели создания: поддержание необходимого экологического баланса и стабильности функционирования экосистем озера Эбейты; сохранение природных комплексов в естественном состоянии; экологическое образование, экологическое просвещение и развитие познавательного туризма; обеспечение рационального использования ценного биологического сырья и пелоидов; охрана редких, исчезающих или нуждающихся в особой охране видов растений и животных.

На территории заказника запрещается: загрязнение озера Эбейты неочищенными сточными и (или) дренажными водами, вредными (загрязняющими) веществами, мытье автотранспорта; выжигание растительности; размещение мусора и отходов производства и потребления; проезд и стоянка вне дорог общего пользования на меха-

нических транспортных средствах граждан (за исключением служебного транспорта); уничтожение или повреждение шлагбаумов, аншлагов, стендов и других информационных знаков и указателей, а также оборудованных экологических троп, мест отдыха и других объектов инфраструктуры заказника; выпас скота (кроме личного скота, принадлежащего жителям близлежащих населённых пунктов, в местах, согласованных с бюджетным учреждением); вырубка деревьев и кустарников (кроме рубок ухода и санитарных рубок); строительство, реконструкция и размещение зданий, строений, сооружений и коммуникаций, не связанных с инфраструктурой заказника и осуществлением недропользования; интродукция живых организмов в целях их акклиматизации; проведение взрывных работ; применение пестицидов. На территории заказника разрешается: организация туристических стоянок, размещение палаточных лагерей в специально отведенных для этого местах; купание в озере и добыча пелоидов для личного использования. А также добыча биологического сырья, геологическое изучение, разведка и добыча пелоидов, регулирование численности объектов животного мира, обитающих на территории заказника, в порядке, установленном законодательством Российской Федерации. По согласованию с Министерством природных ресурсов и экологии Омской области на территории заказника допускается: проведение научно-исследовательских и эколого-просветительских мероприятий; проведение физкультурных, спортивных, культурных и иных массовых мероприятий в специально отведенных для этого местах, а также на дорогах общего пользования в соответствии с законодательством; уничтожение карантинных объектов [6].

Озеро Эбейты – это единственное в регионе месторождение минеральных солей, пелоидов [7, с. 424; 8, с. 330].

Основные этапы его ресурсного освоения представлены в таблице 2.

Данная таблица демонстрирует большое разнообразие видов деятельности на озере Эбейты и изменение характера природопользования – от потребительского (нерационального) к природоохранному (рациональному). Современный, экотуристский, этап его освоения подразумевает формирование вокруг озера территориальной рекреационной системы (ТРС). Это способствует не только устойчивому развитию территории, но и сохранению экологического баланса природных комплексов.

Таблица 2

Этапы освоения озера Эбейты

№ этапа	Наименование этапа	Датировка	Характер освоения
1	Этап стихийного рекреационного освоения	Вторая половина XIX в. – 1928 г.	Использование пелоидов и рапы озера для самолечения
2	Научно-исследовательский этап	1928-1941 гг.	Экспедиционные исследования физико-химических свойств озера, солевых запасов и бальнеологических ресурсов
3	Этап добычи химического сырья	1941-1951 гг.	Добыча глауберовой соли бассейновым методом
4	Этап оценки химического и бальнеологического потенциала	1951-1978 гг.	Географические, химические, бальнеологические исследования озера и медицинские исследования его пелоидов
5	Природоохранный этап	1979-2006 гг.	Получение статуса гидрологического памятника природы и начало добычи рачка <i>Artemia salina</i>
6	Туристско-экскурсионный этап	2006-2012 гг.	Проведение организованных экскурсий
7	Экотуристский этап	2012 г. – по настоящее время	Получение статуса государственного природного комплексного заказника регионального значения и организация экологической тропы

Примечание: составлено авторами по [9, 10].

ТРС в пределах ООПТ может определяться как исторически сложившееся сочетание взаимосвязанных разнородных компонентов природоохранной и рекреационной отрасли, сформировавшееся в природно-экологической и социально-экономической среде региона для поддержания преобладающих средообразующих функций территории и комфортных условий выполнения рекреационных функций в пределах ООПТ [11, с. 71]. ТРС включает в себя несколько взаимосвязанных элементов (подсистем), способствующих её рекреационному освоению [12, с. 19]. Это сочетание взаимосвязанных разнородных компонентов природоохранной и рекреационной отрасли [11, с. 71]. Полностью сложившейся можно считать ту ТРС, в которой существуют и развиваются такие подсистемы, как природно-рекреационная, инфраструктурная, потребительская, рекреационно-деятельностная, кадровая и организационно-управленческая. Частично сложившейся она может считаться в случае, если существуют и развиваются лишь некоторые из этих подсистем. А отсутствующей, если ни одна из данных подсистем не сформировалась.

Экспедиционные научные наблюдения, проведённые авторами на озере Эбейты, показали, что такая ТРС здесь пока не сложилась, а некоторые присущие ей подсистемы представлены лишь частично. Рассмотрим эти подсистемы подробнее.

1. *Природно-рекреационная.* Озеро и прилегающая к нему котловина представляет собой сложный многокомпонентный природный комплекс. Аппрагивность ландшафта заключается в его открытости и своеобразии растительных сообществ. Ввиду этого озеро Эбейты обладает высокой степенью антиподности по сравнению с основными районами постоянного проживания населения. Оно признано учёными-естествоиспытателями в качестве природного феномена, что обуславливает устойчивый спрос на его посещение в туристско-экскурсионных целях.

Эстетика ландшафтов является важным ресурсом человеческого существования [13, с. 50]. Эстетическая ценность ТРС определяется её пейзажной выразительностью, проводимой на основе анализа различных свойств ландшафтов. На основе шкал оценок пейзажной выразительности, адаптированной для ООПТ Омской области [14, с. 241; 15, с. 29], авторами была проведена её экспертная оценка для государственного природного комплексного заказника регионального значения «Озеро Эбейты». Факторы, влияющие на восприятие пейзажа, и шкала их оценки (в баллах) представлены в таблице 3. Эта оценка имеет интегральный характер и складывается из экспертной оценки отдельных пейзажных признаков [15, с. 29]. Все показатели оцениваются по трёхступенчатой градации от 0 до 2 баллов. Наивысшая пейзажная выразительность оценивается в 28 баллов.

Таблица 3

Шкала оценки пейзажной выразительности государственного природного комплексного заказника регионального значения «Озеро Эбейты»

Признаки пейзажной выразительности		Шкала оценок (в баллах)	
Общее впечатление от пейзажа	Наличие доминанты	Выделяется	1
	Многоплановость	3 плана (озеро, соляная пустыня, степь)	2
	Красочность	Меняется несколько раз в год	2
	Натуральность	Натуральный	2
Выразительность рельефа	Характер рельефа	Ровная местность	0
Обилие водных поверхностей	Характер размещения и величина водных объектов	Крупное озеро	2
	Просматриваемость водных объектов	Хорошая (просматривается, формирует пейзаж)	2
Пространственное разнообразие, растительность	Тип пространств	Открытое	1
	Характер размещения	Лесные массивы отсутствуют	0
Природоохранные и уникальные объекты	Наличие и разнообразие природных объектов	Однообразные	1
Антропогенное воздействие	Степень и характер изменения	Условно изменённые	1
	Наличие архитектурных акцентов историко-культурного и эстетического значения	Нет	0
Использование территории в рекреационных целях	Пригодность территории для отдыха	Удобная (экстенсивно используемая в хозяйственной деятельности, легкодоступная территория)	1
	Наличие рекреационных территорий	Территории эпизодического отдыха	0
Суммарная оценка (в баллах)			15

Примечание: составлено авторами по [14, с. 241; 15, с. 29].

Данной оценки достаточно, чтобы считать озеро Эбейты аттрактивным.

2. *Инфраструктурная.* Несмотря на многочисленные идеи создания на озере курорта, туристская инфраструктура фактически отсутствует. Открытая в 2019 г. экологическая тропа, включающая в себя информационные стенды, а также расположенные поблизости туристские стоянки в виде казахской юрты и душевых кабин для смывания соли, в настоящее время не действуют. В июле и августе для отдыхающих временно открываются небольшие палаточные городки. Для устойчивого развития ТРС вблизи озера (например, вблизи расположенных населённых пунктов) следует создать объекты для летнего размещения и питания отдыхающих. В котловине озера восстановить экологическую тропу в виде информационных стендов и арт-объектов, раскрывающих его уникальные природные свойства. Основные подходы к озеру желательно оснастить деревянными настилами, место контакта с водой (бальнеозону) – деревянным пир-

сом, пляжную зону – шезлонгами и переносными пляжными зонтами.

3. *Потребительская (рекреанты, туристы и экскурсанты).* Для определения групп посетителей озера Эбейты исследователями был проведен экспертный опрос шести туристских фирм Омска, которые продают экскурсионные туры («Туристическая компания «ОМиGO», «Лягушка-путешественница», «Колесо путешествий 55», «Дискавери», «Мистер Фогг», «Интур-Омск»), а также опрос сотрудников управлений культуры администраций трех районов, примыкающих к озеру Эбейты, и туристско-информационного центра (ТИЦ) Омской области.

Полученные данные показали, что на ООПТ «Озеро Эбейты» существует организованный поток туристов. При этом группы отдыхающих можно разделить на три категории.

В первую категорию входят люди, посещающие озеро для сбора пелоидов. Они либо занимаются самолечением непосредственно на берегу, либо набирают пелоиды в ёмкости для использования в аналогичных целях в домашних условиях.

Таблица 4

Суммарное число организованных туристов,
посетивших ООПТ «Озеро Эбейты»

Год	Суммарное число организованных туристов (чел.)
2022	237
2023	438
2024	610
2025	Нет данных

Примечание: составлено авторами.

Вторая категория – это туристы и экскурсанты, посещающие озеро в сопровождении гида или экскурсовода. Организаторами туристской и экскурсионной деятельности в разное время выступали: географический факультет Омского государственного педагогического университета, образовательные учреждения и учреждения культуры прилегающих к озеру административных районов, туристские фирмы и общественные организации, занимающиеся самостоятельный туризмом.

Третья категория посетителей – это люди, посещающие озеро самостоятельно из любопытства или с целью проведения фотосессий. К данной категории могут относиться как одиночные посетители, так и семьи или небольшие компании друзей.

Экскурсионные выезды проводятся исключительно в теплый период года, с середины мая по начало октября (чаще всего с июня по август). В зимний сезон и межсезонье выезды не производятся. Набор в экскурсионную группу осуществляется через Интернет либо по запросу от организаций. Основными днями выезда групп являются выходные. Среднее количество экскурсантов, которых вывозят туристские фирмы за один заезд в выходные, составляет 20-50 человек, в зависимости от погоды. Неорганизованные туристы приезжают на озеро на личных автомобилях также преимущественно в выходные дни.

Суммарное число организованных туристов, посетивших ООПТ «Озеро Эбейты» за последние годы, по данным турфирм, представлено в таблице 4.

4. *Рекреационно-деятельностная.* К видам рекреации и туризма в районе озера Эбейты можно отнести: бальнеологический, экологический, экскурсионный. Туристы и экскурсанты во время посещения ведут наблюдения за озером и его соляными отложениями, за рачками *Artemia salina*, га-

лофитной растительностью («марсианский пейзаж») и специфичными природными явлениями, возникающими вследствие озёрных испарений (миражами или солнечными гало). Рекреационные занятия их весьма разнообразны и включают в себя: прогулки, экскурсии, купание, пляжный отдых, обмазывание пелоидами, фотосессии, подвижные игры.

5. *Кадровая (обслуживающий персонал).* В развитых ТРС, как правило, существуют две категории персонала: постоянный (работающий круглогодично) и временный (привлекаемый для проведения сезонных работ). Постоянный персонал – это инспекторы-охотоведы бюджетного учреждения «Управление по охране животного мира Омской области» (БУ «УОЖМОО»), обеспечивающие защиту озера от браконьерства и соблюдение природоохранного режима. Временный персонал – это организаторы палаточных лагерей, экскурсий и волонтеры, привлекаемые для работы с отдыхающими в летний сезон. Развитие инфраструктуры туризма должно существенно расширить численность и функционал этих подгрупп, а также способствовать привлекательности озера как дестинации и развитию индустрии гостеприимства в прилегающих к нему административных районах. Кадровые потребности могут быть удовлетворены за счёт выпускников соответствующих направлений подготовки омских университетов: технического, педагогического, путей сообщения, физической культуры и спорта.

6. *Организационно-управленческая.* Как ООПТ озеро Эбейты охраняется БУ «УОЖМОО». Это учреждение занимается стратегическим управлением всеми заказниками региона и является подразделением областного Министерства природных ресурсов. Туристско-экскурсионную деятельность в регионе курирует Министер-

ство культуры Омской области. При этом её информационное обеспечение осуществляет ТИЦ, входящий в состав автономной некоммерческой организации «Региональный центр организации массовых мероприятий, развития туризма и управления проектами «Омск-400». Такую организацию управления территорией можно считать приемлемой для осуществления контроля за природопользованием (в том числе туристско-рекреационным). Управление туристско-экскурсионной деятельностью в перспективе должно осуществляться арендаторами инвестиционных площадок, предлагаемых для организации туризма. Участие в этом могут принимать и органы власти административных районов, если на их территории возникнет туристско-рекреационная инфраструктура.

Заключение

Таким образом, озеро Эбейты обладает необходимыми предпосылками для формирования полноценной ТРС, некоторые из ее подсистем уже сложились в настоящее время. По мнению авторов, природная уникальность озера сочетается со значительным рекреационным потенциалом. Это даёт возможность для развития здесь не только бальнеологического, экскурсионного и экологического туризма, но и этнографического и даже научного.

Важной перспективой может стать объединение ТРС озера Эбейты с расположенным рядом государственным природным комплексным заказником «Амринская балка». Это родниково-озёрная комплексная система бывшей реки Амре, притока озера Эбейты, сравнительно богатая древесной растительностью. За счёт неё возможно существенное расширение видов рекреационной деятельности (например, рыбалка, бёрдвотчинг и другие).

Развитие ТРС на уникальной природной территории требует экономического обоснования и предположительно может способствовать росту его рекреационной привлекательности, социальному и культурному взаимодействию.

Список литературы

1. Николаева М. Ю., Секретова Л. В. Технологии социально-культурной деятельности в развитии индустрии туризма на территории Омской области // Молодёжь третьего тысячелетия: Сборник научных статей. Омск: Омский государственный университет им. Ф. М. Достоевского, 2016. С. 393-395. EDN: XFFBNX. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27564543> (дата обращения: 12.05.2026).

2. Филиппова Т. А., Юсова Ю. С. Перспективные направления развития прибрежной территории озера Эбейты // Успехи современного естествознания. 2022. №11. С. 88-94. EDN: JXOINQ. DOI: 10.17513/use.37933. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49877966> (дата обращения: 12.05.2026).

3. Колпакова М. Н., Гаськова О. Л., Наймушина О. С., Кривоногов С. К. Озеро Эбейты, Россия: химико-органический и минеральный состав воды и донных отложений // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 1. С. 111-123. EDN: YRUNBO. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32586885> (дата обращения: 25.04.2026).

4. Министерство природных ресурсов и экологии Омской области. Озеро Эбейты. Государственный природный комплексный заказник регионального значения «Озеро Эбейты» // Портал Правительства Омской области. URL: <https://mpr.omskportal.ru/oiv/mpr/otrasl/ekspertiza/ohrana/ozeroEbeit/> (дата обращения: 18.04.2026).

5. Костерова В. В., Баженова О. П., Адам А. М. Эко-системные услуги водных объектов Омской области // Экология и управление природопользованием: сборник научных трудов VI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, г. Томск, 25 ноября 2022 г. Выпуск 6. Томск: Литературное бюро, 2023. С. 60-62. EDN: OMKLGW. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54310813> (дата обращения: 18.04.2026).

6. Постановление Правительства Омской области от 17.05.2012 № 110-п (с изменениями на 07.05.2026 г.) «Об организации государственного природного комплексного заказника регионального значения «Озеро Эбейты» // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/943049134/> (дата обращения: 18.05.2026).

7. Гаупт В. С., Солонько А. В. Озеро Эбейты – уникальный водный объект Омской области // Природное и культурное наследие: Междисциплинарные исследования, сохранение и развитие. Сборник научных статей по материалам XI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (г. Санкт-Петербург, 25 октября 2023 г.). СПб.: Издательство РИПУ им. А. И. Герцена, 2023. С. 424-427. EDN: CKGQSB. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=55082931> (дата обращения: 12.05.2026).

8. Тусупбеков Ж. А., Ряполова Н. Л., Салтыкова В. С. Гидролого-климатические и эколого-географические условия формирования элементов водного баланса озера Эбейты Омской области // Вестник учебно-методического объединения по образованию в области природообустройства и водопользования. 2013. № 5. С. 330-336. EDN: VDNVIN. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25112273> (дата обращения: 18.04.2026).

9. Демешко В. Н. История рекреационного освоения озера Эбейты // Омские социально-гуманитарные чтения – 2020. Материалы XIII Международной научно-практической конференции (г. Омск, 17-19 марта 2020 г.). Омск: Издательство Омского государственного технического университета, 2020. С. 194-199. EDN: TGRVZQ. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43102491> (дата обращения: 18.04.2026).

10. Демешко В. Н. История хозяйственного освоения озера Эбейты // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. 2021. № 4. С. 100-105. EDN: UXXWHT. DOI: 10.17308/geo.2021.4/3756. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47325450> (дата обращения: 18.04.2026).

11. Воронина А. Б. Особенности организации территориальной рекреационной системы на особо охраняемых природных территориях Республики Крым // Современные проблемы сервиса и туризма. 2015. Т. 9. № 1. С. 70-77. EDN: TKUHDZ. DOI: 10.12737/7921. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23067226> (дата обращения: 18.04.2026).

12. Мажар Л. Ю. Национальные туристские маршруты в стратегии развития внутреннего туризма в России //

Туризм и региональное развитие. 2024. № 2 (9). С. 16-27. EDN: VBQBYR. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=82608547> (дата обращения: 12.05.2026).

13. Колбовский Е. Ю., Медовикова У. А. Эстетика ландшафта как новое направление прикладных экологических исследований // Геология, география и глобальная энергия. 2016. № 1. С. 40-52. EDN: VVGOAR. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25922033> (дата обращения: 12.05.2026).

14. Демешко В. Н. Оценка пейзажного разнообразия природного парка «Птичья гавань» в Омске // Познание

и деятельность: от прошлого к настоящему. Материалы V Всероссийской научной конференции (г. Омск, 16 ноября 2023 г.). Омск: Издательство ОмГПУ, 2023. С. 239-242. EDN: PNRDGC. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=64310910> (дата обращения: 12.05.2026).

15. Кочуров Б. И., Бучацкая Н. В. Оценка эстетического потенциала ландшафтов // Юг России: экология, развитие. 2007. Т. 2. Вып. 4. С. 25-34. EDN: JVWKYN. DOI: 10.18470/1992-1098-2007-4-25-34. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=11692295> (дата обращения: 14.07.2026).

Предупреждение: Авторы предупреждают, что самостоятельное применение пелоидов не является медицинской рекомендацией.

Warning: The authors warn that self-administration of peloids is not a medical recommendation.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Финансирование: работа выполнена на средства государственного контракта № Ф 2025.402512 по заказу Министерства природных ресурсов и экологии Омской области.

Financing: the work was carried out at the expense of the state contract № F 2025.402512 commissioned by the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Omsk Region.



МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ РИСКОВ НА ТЕРРИТОРИИ С МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТОЙ (НА ПРИМЕРЕ МАГАДАНСКОЙ ОБЛАСТИ)

Окаёмова Е. С., Науменко А. А.,
Широков Р. С. ORCID ID 0000-0001-8773-4389

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе»,
Москва, Российская Федерация, e-mail: shirokovrs@mgri.ru*

В работе представлены результаты комплексного моделирования геоэкологических рисков, связанных с распространением многолетней мерзлоты на территории Магаданской области. Анализ основан на временных рядах среднемесячных температур, охватывающих период с 1995 по 2024 г. Для оценки температурных трендов и вероятности экстремальных явлений проведено сопоставление полиномиальной аппроксимации и распределения Пуассона. Установлено, что полиномиальная модель демонстрирует высокую точность при ретроспективном анализе, однако ее применение для долгосрочного прогнозирования ограничено из-за высокой степени неустойчивости. Линейная экстраполяция, базирующаяся на данных опорных лет (1995 и 2024), показала удовлетворительную точность, при этом прогноз летних температур на 2025 г. показывает полное совпадение прогнозных и фактических значений. Выявлены устойчивые разнонаправленные тренды, характеризующиеся значительными изменениями температурных показателей. Наиболее вероятный сценарий предполагает наличие трех-четырёх месяцев с экстремальными температурами в течение года. Основные сложности прогнозирования связаны с переходными сезонами, особенно осенью, что обусловлено высокой динамикой климатических процессов в этот период. Подтвержденные тренды указывают на деградацию криолитозоны, активизацию термокарстовых процессов и деформацию инфраструктуры. Это подчеркивает необходимость корректировки строительных норм и стандартов, усиления геотехнического мониторинга и применения ансамблевых методов прогнозирования с адаптивным обновлением моделей для повышения точности и надежности оценок.

Ключевые слова: геоэкологические риски, многолетняя мерзлота, криолитозона, Магаданская область, полиномиальная аппроксимация, распределение Пуассона, температурные тренды, экстремальные температуры, сезонная контрастность, деградация мерзлоты, переходные сезоны, прогнозирование, адаптивное обновление моделей

MODELING OF GEOECOLOGICAL RISKS IN A PERMAFROST AREA (CASE STUDY OF MAGADAN OBLAST)

Okaemova E. S., Naumenko A. A.,
Shirokov R. S. ORCID ID 0000-0001-8773-4389

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
“Russian State Geological Prospecting University named after Sergo Ordzhonikidze”,
Moscow, Russian Federation, e-mail: shirokovrs@mgri.ru*

The paper presents the results of a comprehensive modeling of geo-ecological risks associated with the spread of permafrost in the Magadan Region. The analysis is based on time series of average monthly temperatures covering the period from 1995 to 2024. To assess temperature trends and the probability of extreme events, a comparison was made between polynomial approximation and Poisson distribution. It was found that the polynomial model demonstrates high accuracy in retrospective analysis, but its application for long-term forecasting is limited due to its high degree of instability. Linear extrapolation based on reference years (1995 and 2024) showed satisfactory accuracy, with a perfect match between predicted and actual values of summer temperatures for 2025. Stable multidirectional trends were identified, characterized by significant changes in temperature indicators. The most likely scenario involves 3-4 months with extreme temperatures throughout the year. The main challenges in forecasting are associated with transitional seasons, particularly in autumn, due to the high dynamics of climate processes during this period. The confirmed trends indicate the degradation of the permafrost zone, the activation of thermokarst processes, and the deformation of infrastructure. This highlights the need for adjustments to building codes and standards, increased geotechnical monitoring, and the use of ensemble forecasting methods with adaptive model updates to improve the accuracy and reliability of assessments.

Keywords: geoecological risks, permafrost, cryolithozone, Magadan Oblast, polynomial approximation, Poisson distribution, temperature trends, extreme temperatures, seasonal contrast, permafrost degradation, forecasting, transition seasons, adaptive model updating

Введение

Хозяйственное освоение территорий с многолетнемерзлыми породами, как, например, в Магаданской области, всегда связано с целым рядом геоэкологических ри-

сков [1]. В последние десятилетия на фоне климатических сдвигов устойчивость криолитозоны заметно снижается, и это напрямую отражается на надежности зданий, дорог, трубопроводов и линий электропере-

дач [2]. Для тех регионов, где инженерные объекты эксплуатируются в таких сложных геологических условиях, ключевой задачей становится не просто учет текущих температур, а достоверная оценка будущих изменений. При этом северная специфика требует осторожного обращения с глобальными климатическими моделями: здесь нужен более гибкий подход, который опирается и на прошлые данные, и на понимание того, что температурные скачки могут быть резкими и нелинейными [3, с. 155–166].

Обычно для выявления долгосрочных трендов используют полиномиальную аппроксимацию – она хорошо сглаживает случайные колебания и помогает увидеть общую картину. Однако метод полиномиальной аппроксимации осложняется проблемой численной нестабильности полиномов высоких порядков при попытке прогнозирования вне заданного временного интервала [4, с. 77]. Для оценки экстремальных значений чаще применяют распределение Пуассона, и это дает неплохие вероятностные оценки. Однако если говорить именно о Магаданской области, то совместного сравнения этих подходов с учетом сезонности и переходных периодов пока явно не хватает [5]. До сих пор не до конца понятно, насколько точно разные математические инструменты предсказывают температуру весной и осенью, а также как внутренняя изменчивость внутри сезона сказывается на итоговой погрешности расчетов [2].

Объектом исследования выступает температурный режим приземного слоя воздуха на территории Магаданской области. Исходными данными послужили временные ряды среднемесячных температур за период с 1995 по 2024 г., включая показатели четырех реперных лет (1995, 2005, 2015, 2024 гг.), полученные с сайта Гидрометцентра России. Дополнительно использовались расчетные значения среднегодовых температур, амплитуд колебаний и фазовых сдвигов [6; 7].

Полученные результаты не только уточняют то, что сейчас происходит с климатом в зоне вечной мерзлоты (например, лето становится теплее, а зима холоднее, то есть контрастность растет), но и дают конкретные количественные оценки рисков для криолитозоны. Речь идет о возможной активизации термокарста, деформациях опор инженерных сооружений и изменениях в местных экосистемах. Эти выводы уже сейчас заставляют задуматься о пересмотре строительных норм и более плотном

геотехническом мониторинге в регионе – и в этом, пожалуй, главная практическая ценность работы.

Цель исследования – моделирование геоэкологических рисков на территории Магаданской области в условиях многолетней мерзлоты на основе сопоставления полиномиальной аппроксимации и распределения Пуассона, а также выявление факторов, вносящих наибольшую погрешность в прогнозы при смене сезонов.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Построить полиномиальные модели различных степеней для ретроспективного анализа температурных трендов за 1995–2024 гг. и оценить их объяснительную способность.

2. Применить распределение Пуассона для вероятностной оценки экстремальных температурных месяцев в году.

3. Выполнить сравнительный анализ опорных лет (1995 и 2024 гг.) для количественного определения сдвигов среднегодовых температур, сезонной амплитуды и экстремальных значений.

4. Провести прогноз на 2025 г. и верифицировать его точность, выделив наиболее проблемные периоды (переходные сезоны).

5. Сформулировать рекомендации по повышению точности прогнозирования и адаптации инфраструктурных норм к выявленным трендам.

Материал и методы исследования

1. Исходные данные

Использованы временные ряды среднемесячных температур воздуха на территории Магаданской области за 1995–2024 гг., включая четыре реперных года (1995, 2005, 2015, 2024 гг.). Источник – данные с сайта Гидрометцентра России [7]. Дополнительно – расчетные значения среднегодовых температур, сезонных амплитуд и фазовых сдвигов [8].

2. Методы исследования

Полиномиальная аппроксимация. Методом наименьших квадратов построены полиномы различных степеней. Оптимальной признана модель третьей степени ($R^2 = 0,95$). Полиномы более высоких степеней нестабильны при экстраполяции [4, с. 182].

Распределение Пуассона. Использовано для вероятностной оценки экстремальных температурных месяцев в году. Параметр $\lambda = 4$ (среднее число экстремальных месяцев в год, определенное по историческим данным) [9, с. 67].

Сравнительный анализ опорных лет (1995 и 2024 гг.). Позволил определить сдвиги среднегодовой температуры, изменение сезонной амплитуды и динамику экстремальных значений, а также верифицировать результаты полиномиального моделирования [10].

3. Прогнозирование и оценка точности

Прогноз на 2025 г. выполнен методом линейной экстраполяции на основе опорных лет 1995 и 2024 гг. Оценка точности – средняя абсолютная ошибка (MAE), а также раздельный анализ по сезонам (лето, зима, переходные сезоны) [11].

4. Ограничения методов

– нестабильность полиномов высокой степени за пределами интервала временного ряда;

– допущение о независимости событий и постоянстве λ для распределения Пуассона;

– игнорирование внутрисезонной изменчивости при линейной экстраполяции по двум точкам [9, с. 106].

5. Геоэкологическая интерпретация

Выявленные тренды интерпретированы в терминах рисков деградации криолитозоны: увеличение глубины сезонного протаи-

вания, активизация термокарста, деформации инфраструктуры. На этой основе обоснована необходимость корректировки строительных норм и усиления мониторинга.

Результаты исследования и их обсуждение

В зонах распространения нестабильной многолетней мерзлоты, характеризующихся интенсивным развитием инфраструктуры, точность оценки климатических угроз является ключевым фактором обеспечения долговечности строительных конструкций, транспортных магистралей и трубопроводных систем. Учитывая особенности северных широт, необходим комплексный метод оценки температурной динамики, базирующийся как на анализе исторических рядов наблюдений, так и на учете возможных нелинейных климатических трансформаций [2]. В данном исследовании осуществлен сравнительный анализ математических моделей прогнозирования, а также определены ключевые переменные, провоцирующие максимальные отклонения в расчетах в переходные периоды года [5].



Рис. 1. Зависимость средних температур по месяцам за период с 1995 по 2024 г., Магаданская область
Примечание: составлен авторами на основе источника [7]

В работе использованы временные ряды среднемесячных температур воздуха на территории Магаданской области за период с 1995 по 2024 г. (рис. 1) [2]. Исходные данные включают показатели за четыре реперных года (1995, 2005, 2015, 2024 гг.), что позволило проанализировать многолетнюю динамику температурного режима (данные с сайта Гидрометцентра России) [7]. Дополнительным материалом послужили расчетные значения среднегодовых температур, амплитуд колебаний и фазовых сдвигов для указанных временных срезов [13].

По оси X отложены месяцы года (от января до декабря), по оси Y – температура в $^{\circ}\text{C}$. Каждая линия соответствует одному реперному году и отображает сезонный ход температуры. На основе этих данных полиномиальная аппроксимация была применена для выявления генеральных трендов температурных изменений. Суть метода заключается в подборе полиномиальной функции, которая наилучшим образом описывает временной ряд, сглаживая случайные колебания и выделяя устойчивую направленность изменений. В общем виде полином степени n записывается как

$$Y = a_0 + a_1X + a_2X^2 + a_3X^3 + a_4X^4 + \dots + a_nX^n, \quad (1)$$

где Y – аппроксимируемое значение температуры, X – фактор времени (год или порядковый номер месяца), $a_0 \dots a_n$ – искомые коэффициенты. Для расчета коэффициентов

используется метод наименьших квадратов, который минимизирует сумму квадратов отклонений фактических температурных значений от модельных:

$$\sum \left(Y_{\text{ФАКТ}} - (a_0 + a_1X + a_2X^2 + a_3X^3 + a_4X^4 + \dots) \right)^2 \rightarrow \min. \quad (2)$$

Для аппроксимации данных были вычислены полиномы степеней от первой (линейный тренд) до пятой, параметры которых определялись через систему нормальных уравнений. Качество полученных моделей верифицировалось с помощью коэффициента детерминации R^2 , отражающего степень соответствия модели исходным температур-

ным показателям [4]. В дополнение к этому проводился анализ статистической значимости полученных коэффициентов и проверялась прогностическая устойчивость моделей за пределами исследуемого временного ряда.

В результате расчетов для полинома третьей степени было получено следующее уравнение:

$$y = -0,0927x^3 + 0,9959x^2 + 1,6915x - 20,248, \quad (3)$$

где x – порядковый номер месяца в объединенном ряду из 12 значений (от 1 до 12, где 1 – январь, ..., 12 – декабрь), y – расчетная температура. Уравнение (3) получено по 12 среднемесячным значениям температуры (4 реперных года: 1995, 2005, 2015 и 2024 гг. – по 12 месяцев в каждом), что позволяет выявить генеральный тренд без избыточного влияния межгодовой случайной изменчивости. По данным рис. 2 коэффициент детерминации для этой модели составил $R^2 = 0,9482$, что практически совпадает с указанным ранее значением 0,95.

Полученный коэффициент детерминации ($R^2 \approx 0,95$) указывает на то, что кубическая модель описывает 95 % вариативности температурных показателей в Магаданской области за 1995–2024 гг. Остаточная дисперсия (5 %) представляет собой не объясненную моделью вариацию, которая не может быть содержательно интерпретирована в рамках данной модели и не приписывает-

ся каким-либо конкретным факторам. Такое значение R^2 свидетельствует о высокой объяснительной способности модели и подтверждает правомерность ее использования для ретроспективного анализа температурного режима Магаданской области. Тем не менее использование полиномов более высоких степеней (четвертой и пятой) нецелесообразно для долгосрочного прогнозирования из-за их склонности к неустойчивости при экстраполяции, что ограничивает их применимость для долгосрочных прогнозов [3, с. 155–166].

Для вероятностной оценки экстремальных погодных явлений в Магаданской области авторы обратились к модели распределения Пуассона. Данный метод позволяет рассчитать вероятность того, сколько раз за год могут наблюдаться аномально высокие или низкие температуры, исходя из предположения о случайном характере этих событий и их средней повторяемости [9, с. 106].

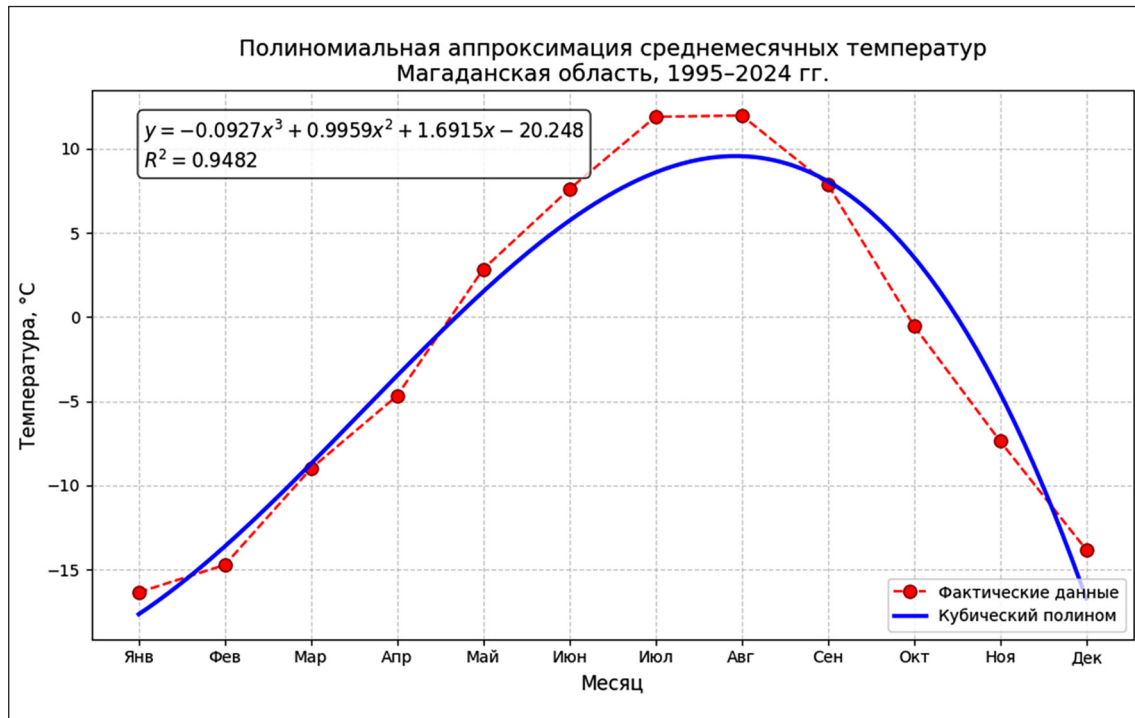


Рис. 2. Полиномиальная аппроксимация зависимости средней температуры от месяца на основе данных с 1995 по 2024 г.

Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Параметр λ (среднее число экстремальных месяцев в год) определен на основе анализа исторических данных за 1995–2024 гг. и составил $\lambda = 4$. Это означает, что в среднем за год наблюдается 4 месяца с экстремальными отклонениями температуры (аномально жарких или аномально холодных) [2].

По формуле распределения Пуассона (4):

$$P(X = k) = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!}, \quad (4)$$

где $P(X = k)$ – вероятность того, что произойдет ровно k экстремальных месяцев в году;

$\lambda = 4$ – среднее ожидаемое число экстремальных месяцев за год;

$e \approx 2,71828$ – основание натурального логарифма;

$k!$ – факториал числа k (произведение всех натуральных чисел от 1 до k).

На основе этой формулы были рассчитаны вероятности для различных значений k – от 0 до 4 и более.

Расчет вероятностей:

1. Вероятность отсутствия экстремальных месяцев ($k = 0$):

$$P(X = 0) = \frac{4^0 \cdot e^{-4}}{0!} = e^{-4} \approx 0,0183,$$

что составляет около 1,83 %. Таким образом, вероятность того, что в течение года не случится ни одного экстремального месяца, крайне мала – менее 2 %.

2. Вероятность одного экстремального месяца ($k = 1$):

$$P(X = 1) = \frac{4^1 \cdot e^{-4}}{1!} = 4e^{-4} \approx 4 \cdot 0,0183 = 0,0733. \text{ Около } 7,33 \, \%.$$

Вероятность одного экстремального месяца более чем втрое выше вероятности их полного отсутствия, но все еще невелика.

3. Вероятность двух экстремальных месяцев ($k = 2$):

$$P(X = 2) = \frac{4^2 \cdot e^{-4}}{2!} = \frac{16 \cdot e^{-4}}{2} = 8 \cdot e^{-4} \approx 8 \cdot 0,0183 = 0,1465. \text{ Это около } 14,65 \, \%.$$

Данный сценарий уже заметно более вероятен.

4. Вероятность трех экстремальных месяцев ($k = 3$):

$$P(X = 3) = \frac{4^3 \cdot e^{-4}}{3!} = \frac{64 \cdot e^{-4}}{6} \approx 10,6667 \cdot 0,0183 \approx 0,1954. \text{ Это около } 19,54 \, \%.$$

Это наибольшее значение среди рассчитанных.

5. Вероятность четырех экстремальных месяцев ($k = 4$):

$$P(X = 4) = \frac{4^4 \cdot e^{-4}}{4!} = \frac{256 \cdot e^{-4}}{24} \approx 10,6667 \cdot 0,0183 \approx 0,1954.$$

Это также около 19,54 % (совпадение с $P(X = 3)$ – свойство распределения Пуассона при $\lambda = 4$). При $\lambda = 4$ вероятности $P(X = 3)$ и $P(X = 4)$ равны из-за рекуррентного соотношения распределения Пуассона:

$$P(X = k + 1) = P(X = k) \cdot \frac{\lambda}{k + 1}.$$

Для перехода от $k = 3$ к $k = 4$ получаем множитель

$$\frac{4}{3 + 1} = \frac{4}{4} = 1, \text{ поэтому } P(X = 4) = P(X = 3) \cdot 1.$$

Это не случайность, а математическое свойство: при целом λ мода распределения достигается на двух соседних значениях ($\lambda - 1$ и λ), имеющих одинаковую максимальную вероятность.

6. Вероятность пяти и более экстремальных месяцев постепенно убывает:

$$P(X = 5) \approx 0,1563 \text{ (15,63 \%)}, P(X = 6) \approx 0,1042 \text{ (10,42 \%)} \text{ и т. д.}$$

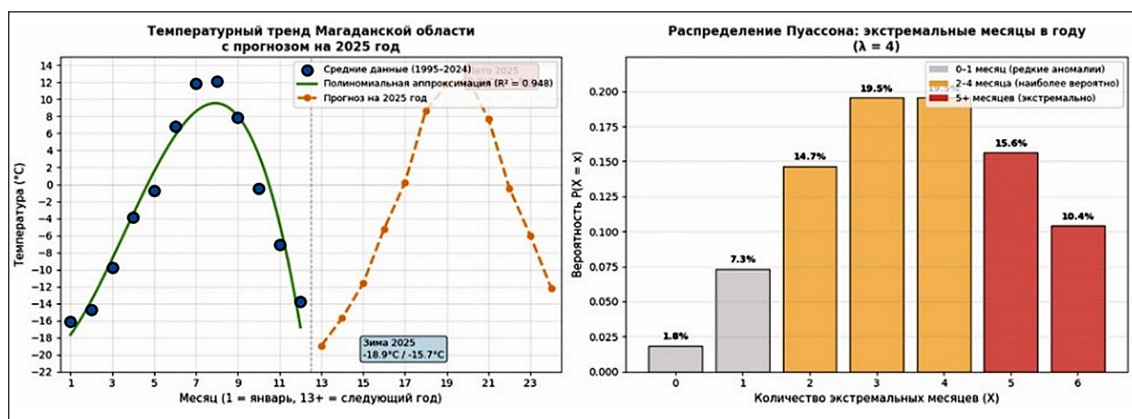


Рис. 3. Графики температурного тренда Магаданской области с прогнозом на 2025 г. и распределение Пуассона: экстремальные месяцы в году ($\lambda = 4$)
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Для территории Магаданской области наиболее характерным прогнозом считается возникновение от трех до четырех месяцев с экстремальными погодными условиями в течение года (с частотой 19,54 % для каждого). Совокупная вероятность того, что количество таких периодов составит от трех до пяти, оценивается выше 54 %. В то же время веро-

ятность отсутствия климатических аномалий в годовом цикле минимальна и не достигает 2 %. Полученные статистические данные являются фундаментом для анализа профильных рисков, совершенствования методов геотехнического контроля и формирования адаптационных стратегий для объектов инфраструктуры в условиях меняющегося климата.

На рис. 3 представлены две графические модели. На левой части отражена динамика среднемесячных температурных показателей по Магаданской области за период с 1995 по 2024 г., дополненная полиномиальной линией тренда третьей степени (коэффициент детерминации $R^2 = 0,948$) и экстраполяцией на 2025 г. Правый фрагмент рисунка иллюстрирует распределение Пуассона (при $\lambda = 4$) в виде гистограммы, отображающей частоту возникновения экстремальных погодных явлений в течение года. На левом графике по оси X отложены месяцы с шагом в один месяц (январь – 1, декабрь – 12, а значения 13 и 14 соответствуют январю и февралю следующего года для отражения непрерывности временного ряда), по оси Y – среднемесячная температура в градусах Цельсия. На правом графике по оси X указано количество экстремальных месяцев в году (от 0 до 6 и более), по оси Y – соответствующая вероятность их наступления, рассчитанная по формуле распределения Пуассона. Согласно расчетам,

максимальная вероятность (19,5 %) характерна для сценариев с тремя или четырьмя аномальными месяцами [2].

На рис. 4 отражены итоги проверки прогностической модели температурных показателей на 2025 г., построенной методом линейной экстраполяции данных за 1995 и 2024 гг. На графике по оси X отложены месяцы года (от января до декабря в хронологическом порядке), по оси Y – температура в градусах Цельсия, при этом каждый месяц представлен тремя столбцами: прогнозное значение на 2025 г., реально зафиксированное значение и величина ошибки прогноза (рассчитанная как разница между реальными и прогнозными показателями). Сравнение расчетных значений со среднесезонными фактическими данными дает возможность верифицировать точность выбранного подхода, обнаружить закономерные погрешности и выделить временные интервалы, наиболее сложные для прогнозирования в специфических условиях криолитозоны Магаданской области.

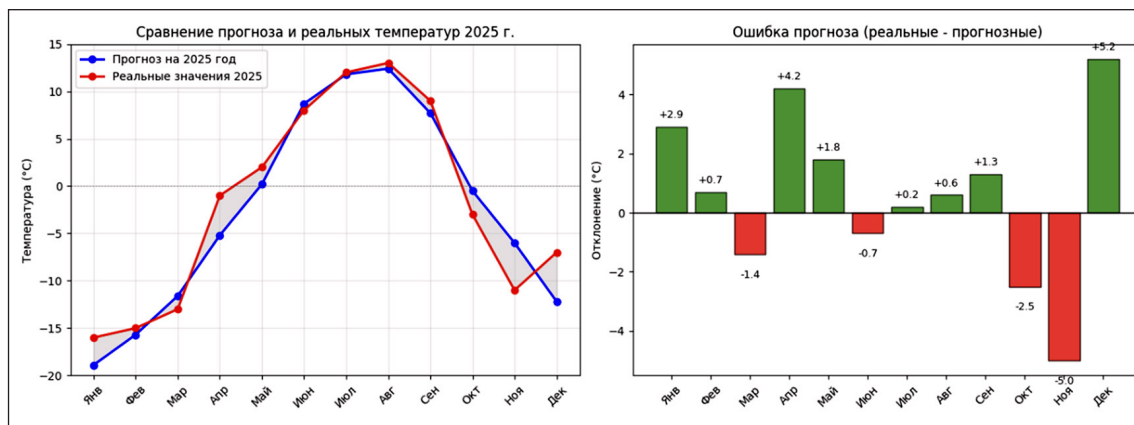


Рис. 4. Сравнение прогноза и реальных температур
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Таблица 1

Сравнение прогнозных и фактических температур по сезонам, 2025 г.

Сезон	Прогноз (°C)	Реальность (°C)	Signed error (прогнозные–реальные), °C	Absolute error (°C)	Характер (математическая конкретика)
Зима	-17,3	-15,5	-1,8	1,8	Прогноз холоднее реальности (реальность выше на 1,8 °C)
Весна	-5,5	-4,0	-1,5	1,5	Прогноз холоднее реальности (реальность выше на 1,5 °C)
Лето	11,0	11,0	0,0	0,0	Полное совпадение (ошибка 0,0 °C)
Осень	0,4	-1,7	+2,1	2,1	Прогноз теплее реальности (реальность ниже на 2,1 °C)

Примечание: составлена авторами на основе источника [7].

Данные сгруппированы по четырем сезонам: зима (январь – февраль), весна (март – май), лето (июнь – август) и осень (сентябрь – ноябрь). Для каждого сезона приведены прогнозная температура, фактически зафиксированная температура, абсолютная ошибка и качественная характеристика отклонения (табл. 1) [2].

Анализ температурных показателей 1995 и 2024 гг. продемонстрировал высокую точность летнего прогноза: при ожидаемых $11,0^{\circ}\text{C}$ фактическое значение совпало с расчетным (погрешность $0,0^{\circ}\text{C}$). Данный результат подтверждает стабильность выявленного ранее тренда на летнее потепление [11]. В зимний период наблюдалось отклонение: при прогнозе $-17,3^{\circ}\text{C}$ реальная температура составила $-15,5^{\circ}\text{C}$ (разница $-1,8^{\circ}\text{C}$). Это свидетельствует о некотором замедлении темпов зимнего похолодания, зафиксированного в 1995–2024 гг. Весенние показатели также оказались выше расчетных ($-4,0^{\circ}\text{C}$ против $-5,5^{\circ}\text{C}$; ошибка $-1,5^{\circ}\text{C}$), что, вероятно, обусловлено повышенной изменчивостью переходных сезонов. Наибольшая амплитуда расхождений была выявлена осенью: прогноз составил $0,4^{\circ}\text{C}$, тогда как по факту было зафиксировано $-1,7^{\circ}\text{C}$ (ошибка $+2,1^{\circ}\text{C}$). Столь существенное отклонение подчеркивает сложность прогнозирования осеннего периода, характеризующегося высокой скоростью климатических переходов и значительными межгодовыми колебаниями.

Ошибки имеют разную направленность. Для зимы и весны прогноз был холоднее реальности (отрицательная ошибка), а для осени – теплее реальности (положительная ошибка). Это говорит о том, что используемая модель линейной экстраполяции не просто имеет случайную погрешность, а демонстрирует сезонно-зависимое систематическое смещение. Она предсказывает более плавный переход от лета к зиме, чем наблюдается в действительности: реальное осеннее охлаждение оказывается резче, а зимние и весенние температуры – выше прогнозируемых.

Однако знак ошибки (signed error) важен для диагностики модели, но не для оценки ее общей точности: положительные и отрицательные отклонения могут взаимно сокращаться при усреднении, создавая иллюзию высокой точности. Для объективной меры используют абсолютную ошибку (absolute error) – это модуль разности между прогнозом и фактом, который показывает реальную величину отклонения в $^{\circ}\text{C}$ независимо от направления. Именно на основе абсолютных ошибок рассчитывается средняя

абсолютная ошибка (MAE), которая приведена ниже.

Анализ полученных данных указывает на усиление сезонной контрастности климатических условий: наблюдается тенденция к повышению летних температурных максимумов при одновременном снижении зимних минимумов. Тем не менее результаты 2025 г. демонстрируют нелинейный характер данных изменений. В частности, реальные показатели зимнего периода превысили прогнозные значения, тогда как осеннее снижение температуры произошло быстрее, чем предполагалось. Столь неоднородная динамика межсезонья подчеркивает неэффективность линейных методов моделирования и обосновывает потребность в разработке более совершенных прогностических инструментов, выходящих за рамки линейной экстраполяции.

Средняя абсолютная ошибка (MAE) по всем сезонам составила

$$MAE = \frac{1,8 + 1,5 + 0,0 + 2,1}{4} = \frac{5,4}{4} = 1,35^{\circ}\text{C}.$$

При рассмотрении данных только за межсезонье (весенне-осенний период) показатель MAE возрастает до $1,8^{\circ}\text{C}$. Это свидетельствует о том, что высокая общая точность модели в значительной степени обеспечивается за счет успешной аппроксимации летних температур.

Для оценки прогностической эффективности предложенной линейной модели результаты были сопоставлены с массивом данных климатического моделирования CMIP6 [13], который является общепринятым мировым стандартом в климатическом моделировании и используется в отчетах МГЭИК [14].

Период верификации: 2025 г.

Сценарии антропогенных выбросов: использованы два сценария Shared Socioeconomic Pathways (SSP):

- SSP2-4.5 (умеренный): предполагает средний уровень выбросов парниковых газов, соответствующий «промежуточному» пути развития общества с постепенной адаптацией к климатическим изменениям.

- SSP5-8.5 (высокие выбросы): «пессимистический» сценарий с высокой зависимостью от ископаемого топлива и интенсивным ростом выбросов на протяжении XXI в.

Для каждого сценария вычисляется медиана (50-й процентиль), представляющая наиболее вероятное значение, а также диапазон от 5 до 95 перцентилей, демонстрирующий разброс между моделями и степень неопределенности прогноза. Медиана определяется как центральное значение в упорядоченном наборе данных.

доченном ряду результатов всех моделей ансамбля CMIP6 (в случае четного количества моделей она рассчитывается как среднее арифметическое двух средних значений). В отличие от среднего арифметического, медиана более устойчива к экстремальным отклонениям и точнее отражает «типичный» прогноз. Диапазон 5–95 перцентилей исключает по 5 % самых «холодных» и «теплых» прогнозов, что позволяет отбросить крайние значения и выделить область основного согласия между моделями.

В табл. 2 выполнено прямое сопоставление сезонных температур, полученных методом линейной экстраполяции, с медианными значениями ансамбля CMIP6 для двух сценариев.

Результаты линейного прогноза оказались весьма сопоставимы с медианными показателями ансамбля CMIP6. Наиболее заметная разница наблюдается весной при использовании сценария SSP2-4.5, где предсказанная температура оказалась ниже на 0,6 °C. Минимальное расхождение, составившее всего 0,1 °C, зафиксировано для зимнего периода по сценарию SSP5-8.5. Важно отметить, что все выявленные отклонения не выходят за пределы 0,6 °C, что свидетельствует о хорошей согласованности между простым линейным подходом и комплексными моделями климата CMIP6.

В табл. 3 реальные (фактически зафиксированные) температуры за 2025 г. сопоставлены с диапазоном 5–95 перцентилей ансамбля CMIP6. Это позволяет оценить, насколько наблюдаемые значения уклады-

ваются в предсказанную моделями изменчивость температурного ряда [15].

Анализ табл. 3 показывает, что зимний период оказался теплее прогнозируемого: фактическая температура -15,5 °C превысила расчетное значение -17,3 °C на 1,8 °C. Полученное значение не достигает верхней границы доверительного интервала (-14,5 °C), но приближается к ней, что указывает на тенденцию к смягчению зимних условий. Весенние температуры также превысили прогноз (-4,0 °C против -5,5 °C), тогда как осенью фактическое значение (-1,7 °C) оказалось ниже расчетного (+0,4 °C), что связано с более резким понижением температуры, чем предполагала линейная экстраполяция. Наибольшее расхождение зафиксировано в осенний период (+2,1 °C), что подтверждает ограниченную применимость линейных моделей для прогнозирования переходных сезонов.

На рис. 5 представлены результаты верификации прогноза по ансамблю моделей CMIP6 для Магаданской области на 2025 г. По оси X отложены сезоны года (зима, весна, лето, осень), по оси Y – температура в °C. Для каждого сезона приведены три показателя: прогноз, полученный методом линейной экстраполяции, усредненный прогноз по ансамблю CMIP6 и фактические данные 2025 г. Дополнительно на графике отображены ошибки прогноза (в °C) с указанием знака отклонения, что позволяет наглядно сравнить точность двух подходов к прогнозированию – линейной экстраполяции и ансамблевого моделирования [14].

Таблица 2

Сравнение прогнозов на 2025 г. (по сезонам)

Сезон	Прогноз (°C)	CMIP6 SSP2-4,5 (°C)	CMIP6 SSP5-8,5 (°C)	Расхождение
Зима (дек – фев)	-17,3	-16,8	-17,2	+0,5 / +0,1
Весна (мар – май)	-5,5	-4,9	-5,3	+0,6 / +0,2
Лето (июн – авг)	11,0	10,7	11,4	-0,3 / -0,4
Осень (сен – ноя)	0,4	0,2	0,5	-0,2 / -0,1

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

Таблица 3

Реальные температуры 2025 г. «против» диапазона CMIP6

Сезон	Реальность 2025 (°C)	CMIP6 диапазон (5–95 перцентиль)	Реальность внутри диапазона
Зима	-15,5	от -19,2 до -14,5	Да (на верхней границе)
Весна	-4,0	от -6,8 до -3,2	Да
Лето	11,0	от 9,5 до 13,2	Да
Осень	-1,7	от -1,2 до +2,1	Нет (ниже нижней границы)

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

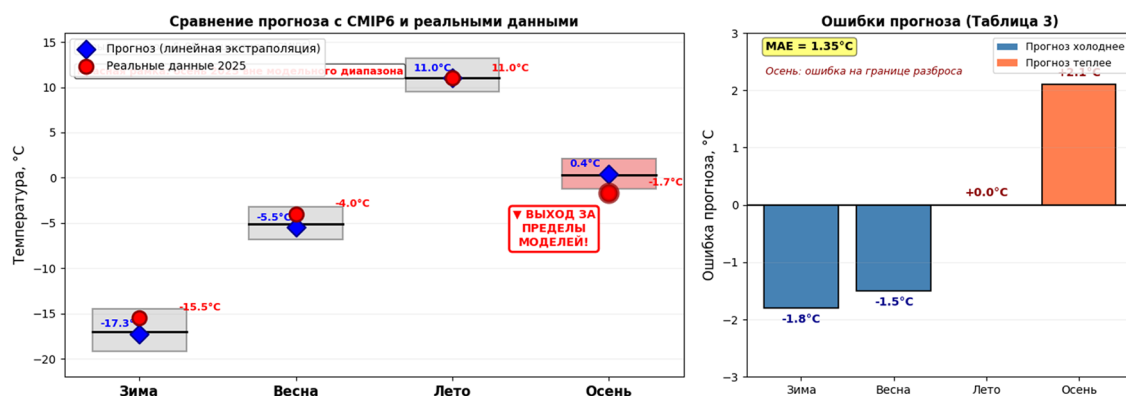


Рис. 5. Верификация прогноза по ансамблю CMIP6, Магаданская область, 2025 г.

Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

В ходе анализа было установлено, что погрешность линейной экстраполяции в течение всего календарного года не выходит за пределы вариативности, наблюдаемой в ансамблях моделей CMIP6. Для зимнего, весеннего и летнего периодов погрешность не превышает пределов неопределенности, присущей моделям, что свидетельствует о допустимом уровне точности применяемого подхода. Осенняя погрешность, составившая +2,1 °C, приближается к значению разброса (3,3 °C) и локализуется на его периферии. Данный факт подтверждает, что осенний сезон остается наиболее трудным для прогнозирования, даже при условии использования усовершенствованных ансамблевых моделей.

На основе данного моделирования проведено исследование по активизации термоабразионных процессов на примере Переволочного залива который является индикатором деградации многолетней мерзлоты. Усиление сезонной контрастности выражается в росте летних температур на 1,9 °C и зимнем похолодании на 5,7 °C за период 1995–2024 гг., что увеличило годовую амплитуду до 20,0 °C. Одновременно продолжительность безледного периода в Охотском море возросла, что удлинит интервал волнового воздействия на береговые уступы. Совокупность этих факторов привела к активизации термоабразионных процессов: по данным спутникового мониторинга, скорость отступления льдистых берегов Переволочного залива достигает 10 м/год, что в 3–4 раза превышает показатели для участков, сложенных малоледистыми породами [16]. Поперечный профиль берега фиксирует характерные морфологические признаки – крутой

склон с углом более 30°, зону обрушения и размыв подошвы уступа. Результаты исследования свидетельствуют о катастрофической активизации разрушения льдистых берегов: скорость отступления достигает 10 м/год и более, что в 3–4 раза превышает показатели для берегов, сложенных малоледистыми породами.

Закключение

Проведенный анализ температурных изменений на территории Магаданской области в условиях многолетней мерзлоты позволяет сделать следующие основные выводы.

Полиномиальная модель третьей степени продемонстрировала высокую степень соответствия при ретроспективном анализе температурных рядов 1995–2024 гг., достигнув коэффициента детерминации ($R^2 = 0,95$), что указывает на объяснение 95 % вариативности данных. Выведенное уравнение полинома имеет вид

$$y = -0,0927x^3 + 0,9959x^2 + 1,6915x - 20,248.$$

Следует отметить, что полиномы высоких порядков характеризуются пониженной стабильностью при экстраполяции, что накладывает ограничения на их применимость для составления долгосрочных прогнозов.

Анализ крайних точек наблюдаемого периода, а именно 1995 и 2024 гг., выявил противоположно направленные векторы изменений: отмечено потепление в летний период (увеличение средних максимальных температур с 9,9 до 11,8 °C) и охлаждение в зимний период (снижение средних минимальных температур с -14,3 до -20,0 °C). Вследствие данных тенденций годовая амплитуда температурных колебаний возросла

на 3,05 °C, что является индикатором нарастания сезонной контрастности. Данный сценарий представляет собой наиболее неблагоприятный вариант развития событий для криолитозоны, поскольку более интенсивное летнее прогревание способствует увеличению глубины сезонного оттаивания, а более холодные зимы не в состоянии обеспечить адекватную компенсацию потерь теплового баланса.

При $\lambda = 4$ распределение Пуассона показывает, что наиболее вероятны два исхода: за год может быть 3, либо 4 экстремальных месяца. Для каждого из этих вариантов вероятность равна 19,54 %. Напротив, полное отсутствие аномалий представляется маловероятным, поскольку его шанс не дотягивает до 2 %. А то, что при $\lambda = 4$ вероятности для трех и четырех экстремальных месяцев совпадают, связано с рекуррентным свойством распределения Пуассона. Если подставить значения в формулу, выйдет

$$P(X = 4) = P(X = 3) \cdot \lambda / (k + 1) = P(X = 3) \cdot 1.$$

Такое равенство является математической особенностью, возникающей при целочисленном λ .

Проведенная линейная экстраполяция, основанная на данных за 1995 и 2024 гг., продемонстрировала удовлетворительную точность. В среднем за весь год абсолютное отклонение составило 1,35 °C. Наиболее точным оказался летний прогноз, где расхождение составило 0 °C, подтверждая стабильность тенденции к повышению летних температур. Ситуация в переходные периоды отличалась. В осенние месяцы прогноз оказался завышенным: расчетные значения превышали фактические на 2,1 °C. Зимний и весенний периоды характеризовались систематическим занижением температур, с ошибками в -1,8 и -1,5 °C соответственно. Осенние месяцы представляют наибольшую сложность для прогнозирования из-за резкости и непредсказуемости температурных спадов в это время года.

Анализ температурных данных в сравнении с ансамблем климатических моделей фазы 6 CMIP6 выявил, что примененная методика линейной экстраполяции демонстрирует результаты, близкие к медианным значениям ансамбля. Данные о фактических температурах 2025 г. за зимний, весенний и летний периоды располагаются в пределах 5–95 % перцентилей CMIP6. Исключением стал осенний сезон, когда зарегистрированная температура -1,7 °C оказалась ниже нижней границы модельного интер-

вала (-1,2 °C), что привело к выходу за пределы предсказанного диапазона. Этот факт указывает на то, что существующие климатические модели систематически занижают скорость и силу осенне-зимних похолоданий в исследуемом регионе. Данный анализ позволяет заключить, что простая схема прогнозирования по уровню точности сопоставима со сложными ансамблевыми подходами, за исключением осеннего сезона.

Подтвержденные тренды усиления сезонной контрастности свидетельствуют о продолжающейся деградации криолитозоны, активизации термокарстовых процессов, деформациях инфраструктуры и трансформации экосистем. Полученные результаты обосновывают необходимость корректировки строительных норм и усиления геотехнического мониторинга в Магаданской области.

Список литературы

1. Белолипецкий В. М., Генова С. Н. Применение одномерной вертикальной модели сезонно-талого слоя для района оз. Тулик (Аляска) // Вычислительные технологии. 2021. Т. 26. № 4. С. 4–15. DOI: 10.25743/ICT.2021.26.4.002.
2. Малкова Г. В., Павлов А. В., Скачков Ю. Б. Оценка устойчивости мерзлых толщ при современных изменениях климата // Криосфера Земли. 2011. Т. 15. № 4. С. 33–36. EDN: OKDUVB.
3. Кислов А. В. Климатология с основами метеорологии. М.: Издательство МГУ, 2023. 255 с. ISBN 978-5-19-011812-4.
4. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика: для инженеров и научных работников. М.: Физматлит, 2006. 816 с. ISBN 5-9221-0707-0.
5. Шихов А. Н., Землянкова А. А., Никитина П. А., Макарьева О. М. Оценка применимости глобальных климатических моделей CMIP6 для прогнозирования изменения климата и частоты опасных природных явлений в Магаданской области // Метеорология и гидрология. 2026. Т. 51. № 1. С. 11–22. DOI: 10.3103/S1068373926010024.
6. Десяткин Р. В. Изменение климата и динамика мерзлотных экосистем центра материковой криолитозоны Северного полушария // Вестник Российской академии наук. 2018. Т. 88. № 12. С. 1113–1121. DOI: 10.31857/S086958730003190-7.
7. Гидрометцентр России. Среднемесячные температуры воздуха. Станции Магаданской области // Гидрометцентр России. [Электронный ресурс]. URL: <https://meteof.ru> (дата обращения: 10.05.2026).
8. O'Neill B. C., Tebaldi C., van Vuuren D. P., Eyring V., Friedlingstein P., Hurtt G., Knutti R., Kriegler E., Lamarque J.-F., Lowe J., Meehl G. A., Moss R., Riahi K., Sanderson B. M. The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6 // Geoscientific Model Development. 2016. Vol. 9. Is. 9. P. 3461–3482. DOI: 10.5194/gmd-9-3461-2016.
9. Вентцель Е. С. Теория вероятностей: учебник для студентов высших технических учебных заведений. 11-е изд. М.: КноРус, 2010. 658 с. ISBN 978-5-406-00476-0.
10. Абрамов Д. А., Макарьева О. М., Землянкова А. А., Осташов А. А., Нестерова Н. В. Геотемпературный мониторинг криолитозоны Магаданской области 2021–2024 гг. // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 2024. № 11. DOI: 10.24412/2687-1092-2024-11-450-456.

11. Васильев А. А., Облогов Г. Е., Широков Р. С. Долговременный мониторинг глубины сезонного протаивания пород в типичных тундрах Западного Ямала // Криосфера Земли. 2023. Т. 27. № 4. С. 3–13. DOI: 10.15372/KZ20230401.
12. Eyring V., Bony S., Meehl G. A., Senior C. A., Stevens B., Stouffer R. J., Taylor K. E. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization // *Geoscientific Model Development*. 2016. Vol. 9. Is. 5. P. 1937–1958. DOI: 10.5194/gmd-9-1937-2016.
13. Copernicus Climate Change Service, Climate Data Store, (2021): CMIP6 climate projections. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS) // Copernicus Climate Change Service. [Электронный ресурс]. URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/projections-cmip6?tab=overview> (дата обращения: 10.05.2026). DOI: 10.24381/cds.c866074c.
14. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biavati G., Bidlot J., Bonavita M., Chiara G. D., Dahlgren P., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hogan R. J., Hólm E., Janisková M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez P., Lupu C., Radnoti G., de Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Villaume S., Thépaut J.-N. The ERA5 global reanalysis // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2020. Vol. 146. Is. 730. P. 1999–2049. DOI: 10.1002/qj.3803.
15. Катцов В. М., Павлова Т. В., Говоркова В. А., Мелешко В. П., Спорышев П. В., Хлебникова Е. И., Школьник И. М. Сценарные прогнозы изменений климата на территории России в XXI веке на основе ансамблевых расчетов с моделями CMIP6 // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. 2022. № 604. С. 5–54. EDN: FSZLWR.
16. Арэ Ф. Э., Григорьев М. Н., Рахольд Ф., Хуббертен Х.-В. Определение скорости отступления термоабразионных берегов по размерам термотеррас // Криосфера Земли. 2004. Т. 8. № 3. С. 52–56. URL: <https://evgengusev.narod.ru/laptev/are-2004.html> (дата обращения: 23.08.2026).

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.

СТАТЬЯ

УДК 528.5
DOI 10.17513/use.38547



CC BY 4.0

**К ВОПРОСУ ПРИМЕНЕНИЯ КОСВЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ
ИЗМЕРЕНИЙ СКВАЖИННЫМ ИНКЛИНОМЕТРОМ
В СИСТЕМЕ СТРУКТУРНОГО МОНИТОРИНГА**

**Кривошеев К. В. ORCID ID 0009-0004-8608-1012,
Бондаревский В. Д. ORCID ID 0009-0001-0428-4130**

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный университет геодезии и картографии»,
Москва, Российская Федерация, e-mail: krivosheevkv@miigaik.ru*

На данный момент мониторинг структурного состояния объектов капитального строительства повсеместно интегрируется с технологией информационного моделирования. Сложные комплексы датчиков различных типов позволяют собрать статическую информацию о физическом состоянии конструкции и постоянно актуализировать информационную модель. Функционирование подобных комплексов зависит от архитектуры датчиковой сети, резервирования и дублирования подсистем. В данной статье в целях расширения эксплуатационных возможностей при деформационном и структурном мониторинге рассмотрен вопрос перспективы и теоретической целесообразности определения вертикальных смещений вертикальным скважинным инклинометром, наравне с плановыми смещениями. Рассмотрена возможность по результатам косвенных измерений инклинометра создать дублирующие или вспомогательные подсистемы мониторинга. Получена зависимость вертикального смещения от угла наклона зонда инклинометра, демонстрирующая монотонное возрастание при увеличении угла наклона. Представлены результаты измерений инклинометром на экспериментальном стенде, позволяющем свободно изменять геометрию скважины и искривлять траекторию движения инклинометрического зонда. Для выполнения стендового эксперимента применялся вертикальный цифровой инклинометр C17-PRO и специализированное программное обеспечение «In-Port Pro». Результаты измерений дополнительно обработаны графоаналитическим методом, что позволило определить накопление вертикального смещения между забоем и устьем скважины стенда. Наблюдается зависимость накопления вертикальных смещений от степени искривленности скважины. Накопление вертикального смещения получено аналитически, наибольшее значение составило 20,58 мм на 9 м базы экспериментального стенда. Полученные результаты позволяют допустить возможность расширения эксплуатационных возможностей скважинного инклинометра при деформационном и структурном мониторинге, используя косвенные результаты измерений для специальных задач.

Ключевые слова: скважинный инклинометр, мониторинг, вертикальные смещения, геометрическая проекция, геодезические средства измерений, неопределенность измерений

**ON THE ISSUE OF APPLYING BOREHOLE INCLINOMETER'S
INDIRECT MEASUREMENT RESULTS IN A STRUCTURAL
HEALTH MONITORING**

**Krivosheev K. V. ORCID ID 0009-0004-8608-1012,
Bondarevskiy V. D. ORCID ID 0009-0001-0428-4130**

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
“Moscow State University of Geodesy and Cartography”,
Moscow, Russian Federation, e-mail: krivosheevkv@miigaik.ru*

Today monitoring of the structural condition of capital construction facilities is widely integrated into information modeling technology. Complex sensor installations of various types make it possible to collect static information about the physical condition of the structure and constantly update the information model. The functioning of such installations depends on the architecture of the sensor network, reservation and duplication of subsystems. In this article, in order to expand the operational capabilities of deformation and structural monitoring, the issue of the prospects and theoretical feasibility of determining vertical displacements with a vertical borehole inclinometer, along with horizontal (in-plane) displacements, is considered. The possibility of creating duplicate or auxiliary monitoring subsystems based on the results of indirect inclinometer measurements is considered. The dependence of the vertical displacement on the angle of inclination of the inclinometer probe is determined, demonstrating a monotonic increase with increase of an inclination angle. The results of the measurements with an inclinometer on the experimental stand are presented, which allows to freely change the geometry of the well and bending the trajectory of the inclinometric probe. The C17-PRO vertical digital borehole inclinometer and the «In-Port Pro» specialized software were selected for use in the practical part of the research. The measurement results were additionally graphoanalytically processed, which made it possible to determine the accumulation of the vertical displacements between the bottom and the wellhead of the stand. A dependence is observed between the accumulation of vertical displacements and the degree of well curvature. The accumulation of vertical displacement was obtained analytically; the maximum value was 20.58 mm over a 9-meter base of the experimental stand. The obtained results make it possible to suggest the potential of expanding the operational capabilities of the borehole inclinometer during deformation and structural monitoring, using indirect measurement results for special tasks.

Keywords: downhole inclinometer, monitoring, vertical displacement, geometric projection, geodetic measuring instruments, measurement uncertainty

Введение

Учитывая возможности современной вычислительной техники, стоит отметить, что преимуществом технологии информационного моделирования (ТИМ/ВМ) является потенциал к увеличению детализации и информационной наполненности. Но детализированная, информационно наполненная модель не отвечает на вопрос о текущем физическом состоянии инженерного сооружения, введенного в эксплуатацию. Решением являются системы структурного мониторинга, такие как SHM (Structural Health Monitoring) [1; 2, с. 136–141], включающие в себя или взаимосвязанные с автоматизированными системами геодезического мониторинга деформации сооружений (АСГМД) [3]. Данные системы позволяют фиксировать физические величины: напряжения, вибрации, горизонтальные и вертикальные смещения, углы наклона конструкций и другие параметры, позволяя создать цифровой двойник инженерного сооружения. Причем для наблюдения за каждой контролируемой величиной требуется свой тип датчика и метод измерения. Возникает совокупность измерительных, вычислительных, аналитических компонентов, объединенных в единую платформу.

При интеграции данных из системы структурного мониторинга в информационную модель возникает проблема – система аналитики и интерпретации данных, получающая данные с центральных блоков управления системы мониторинга в ТИМ-проект, должна осуществить массу операций по актуализации модели. При этом система может «не знать и не понимать», как в точности она должна это сделать и какие операции делать запрещено. Требуется отладка системы, установка для каждого датчика или индикатора безопасных и пороговых пределов. Требуется расчет приоритизации и оценки риска.

Использование системы структурного мониторинга требует внимательного и ответственного подхода как в отладке системы, так и в создании сети датчиков, который должен основываться на следующих базовых принципах:

- 1) анализ критических узлов и элементов конструкции (те части, от которых зависит общая надежность, контролируются с приоритетной интенсивностью);
- 2) определение плотности сенсорной сети (количество датчиков на единицу площади или на элемент конструкции, создающее распределенную сеть для улавливания локальных эффектов);

3) избыточность и резервирование (так как мониторинг рассчитан на длительную работу, неизбежно некоторые датчики выйдут из строя, поэтому необходимо закладывать дублирующие системы и подсистемы).

Исходя из приведенных трех принципов, возникает вопрос: возможно ли использовать применяемые датчики «нестандартным» образом, чтобы по косвенным результатам обработки измерений получить данные для оптимизации системы, увеличения статистических данных, дублирования и контроля основных датчиков?

Цель исследования – рассмотрение возможности расширения эксплуатационных возможностей скважинного инклинометра при деформационном и структурном мониторинге, а также перспективы и теоретической целесообразности определения вертикальных смещений вертикальным скважинным инклинометром наравне с плановыми смещениями.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и выполнены следующие задачи:

- 1) разработана методика определения вертикальных смещений вертикальным скважинным инклинометром;
- 2) выполнены полевые измерения на практическом стенде;
- 3) выполнены обработка и анализ полученных данных.

Материалы и методы исследования

В качестве рассматриваемого прибора был выбран вертикальный скважинный инклинометр, который может представлять собой портативный измерительный зонд или стационарную датчиковую косу (измерительные модули соединены в одну цепочку). Инклинометры используются для определения направления, величины, а также скорости смещений в грунтовых массах и конструкциях при краткосрочном и долгосрочном мониторинге состояния [4]. Поэтому инклинометры применимы для решения различных задач, например для определения устойчивости подпорных стен путем измерения изгиба; для мониторинга грунтового массива в зоне проведения строительных работ (строительство тоннелей, зданий и т. д.) [5]; для определения устойчивости дамб [6] и насыпей; для определения деформации свай, для контроля вертикальных осадков ж/д и автодорожных насыпей [7]. Инклинометрия активно используется в нефтегазовой отрасли при бурении скважин. При геотехническом мо-

нитинге инклинометры зачастую применяются для определения деформации шпунтового ограждения и стен в грунте [8] и для мониторинга естественных и искусственных склонов [9; 10], в том числе оползневых.

В частности, рассматривается двухосевой скважинный инклинометр, измерительный зонд которого оснащен двумя датчиками угла наклона, расположенными под углом 90° относительно друг друга, предназначен для измерений углов по двум взаимно перпендикулярным плоскостям и применяется для измерений в вертикальных скважинах [11]. Вертикальный портативный скважинный инклинометр предназначен для измерения горизонтальных смещений вдоль вертикального профиля. Расстояние между двумя соседними измерительными точками, используемое при расчете профиля смещений, составляет измерительную базу. При проведении периодических измерений зонд инклинометра перемещается с одинаковым шагом вдоль измерительного профиля по скважине, при этом шаг измерений должен совпадать с длиной зонда и измерительной базой [12].

Схема измерений с применением портативного скважинного инклинометра представлена на рис. 1, где L – длина зонда ($const = 0,5$ м); l – шаг измерений (в данном

случае соответствует длине зонда, то есть $l = L$); n – количество измерений; θ_i – угол наклона измерительного зонда при $\theta_i \in [0^\circ; 90^\circ]$, измеренный в i -й измерительной точке. За реперную точку в данном случае принимается ось нижней пары направляющих роликов инклинометрического зонда при забое скважины. Таким образом, горизонтальное смещение в отдельном шаге измерений можно вычислить по формуле (1), плановое смещение устья скважины относительно ее забоя по формуле (2):

$$S_i = l \cdot \sin \theta_i, \quad (1)$$

$$S = \sum_1^n S_i \quad (2)$$

Из рис. 1 и формул (1), (2) отчетливо видно, что скважинным вертикальным инклинометром измеряется зенитный угол (θ_i) и вычисляется горизонтальное смещение (S_i). Косвенным результатом вычислений будет являться вертикальное смещение.

При нахождении зонда инклинометра в недеформированной скважине он сохраняет вертикальное положение, тем самым $\theta_i = 0^\circ$. В деформированном участке ось нижней пары направляющих роликов инклинометрического зонда становится реперной точкой (O_1).

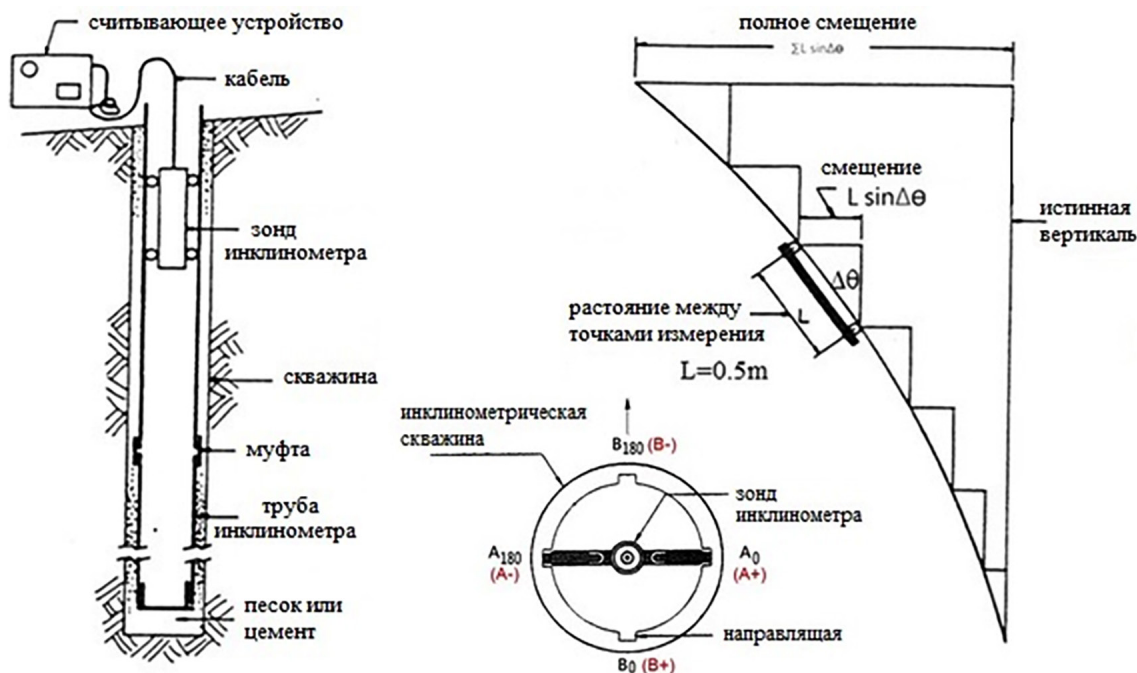


Рис. 1. Схема измерения горизонтальных смещений портативным скважинным вертикальным инклинометром
Примечание: составлен авторами на основе источника [13]

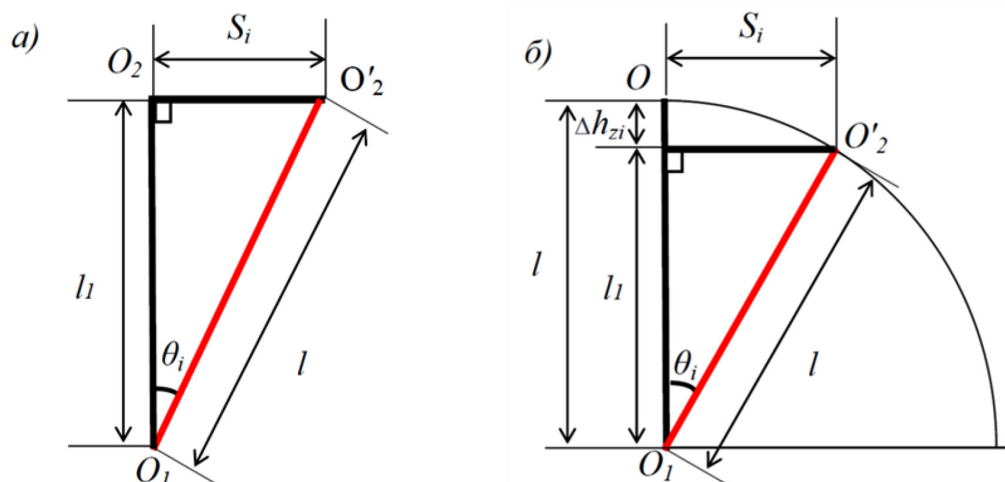


Рис. 2. Геометрическое описание инклинометрических измерений:

а) схема для определения горизонтальных смещений;

б) схема, учитывающая вертикальное смещение при наклоне зонда инклинометра

Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Горизонтальным смещением (S_i) является отрезок между точкой (O'_2), совмещенной с осью верхней пары направляющих роликов в наклонном положении зонда, и точкой (O_2), совмещенной с осью верхней пары направляющих роликов в вертикальном положении зонда. Данный отрезок (S_i) перпендикулярен оси (которая пересекается с отрезком l_1) зонда инклинометра в вертикальном положении. Угол $O_2O_1O'_2$ будет равен углу θ_i . Образуется прямоугольный треугольник $O_2O_1O'_2$ с гипотенузой l , равной длине зонда (рис. 2, а). Данная схема описывает определение горизонтального смещения (S) по формуле (1).

Однако, поскольку O_1 является реперной точкой, наклон зонда на угол θ_i происходит по радиусу, равному длине зонда (рис. 2, б). Закономерно, точки O'_2 и O не находятся на одном отрезке, перпендикулярно отложенном от оси зонда инклинометра в вертикальном положении. Тогда отрезок S_i в треугольнике $OO_1O'_2$ является высотой, опущенной из вершины угла OO'_2O_1 . Поскольку в данных геометрических построениях учитывается смещение по радиусу верхней точки зонда относительно нижней, отрезки $O_1O'_2$ и O_1O будут равны. Тогда треугольник $OO_1O'_2$ является равнобедренным.

Из рассмотренных построений видно, что прямоугольный треугольник $O_2O_1O'_2$ на рис. 2, а, оказывается элементом равнобедренного треугольника $OO_1O'_2$ на рис. 2, б, таким образом выражение (1) остается справедливым для определения S_i . Выполнен-

ные геометрические построения позволяют оценить и вычислить вертикальное смещение (Δh_{zi}) точки O'_2 (совмещенной с осью верхней пары направляющих роликов в наклонном положении зонда) относительно точки O (совмещенной с осью верхней пары направляющих роликов в вертикальном положении зонда):

$$\Delta h_{zi} = l - l_1, \quad (3)$$

$$l_1 = \sqrt{l^2 - S^2}. \quad (4)$$

Система выражений (1), (3), (4) может быть преобразована в единое выражение (5) для отдельного шага измерений скважинным инклинометром. Совокупное вертикальное смещение от забоя до устья, возникшее из-за искривления скважины, определяется по формуле

$$\Delta h_{zi} = l - \sqrt{l^2 - (l \cdot \sin \theta_i)^2}, \quad (5)$$

$$\Delta h_z = \sum_1^n \Delta h_{zi} \quad (6)$$

Выражения (5), (6), как и геометрические построения (рис. 2, б), рассматриваются в рамках плоской задачи, где смещения рассматриваются в осях X , Z , а смещения по оси Y отсутствуют или пренебрежимо малы. Соответственно, совокупное вертикальное смещение (Δh_z) характеризует изменение между исходным и повторным профилями скважины в рамках плоской задачи.

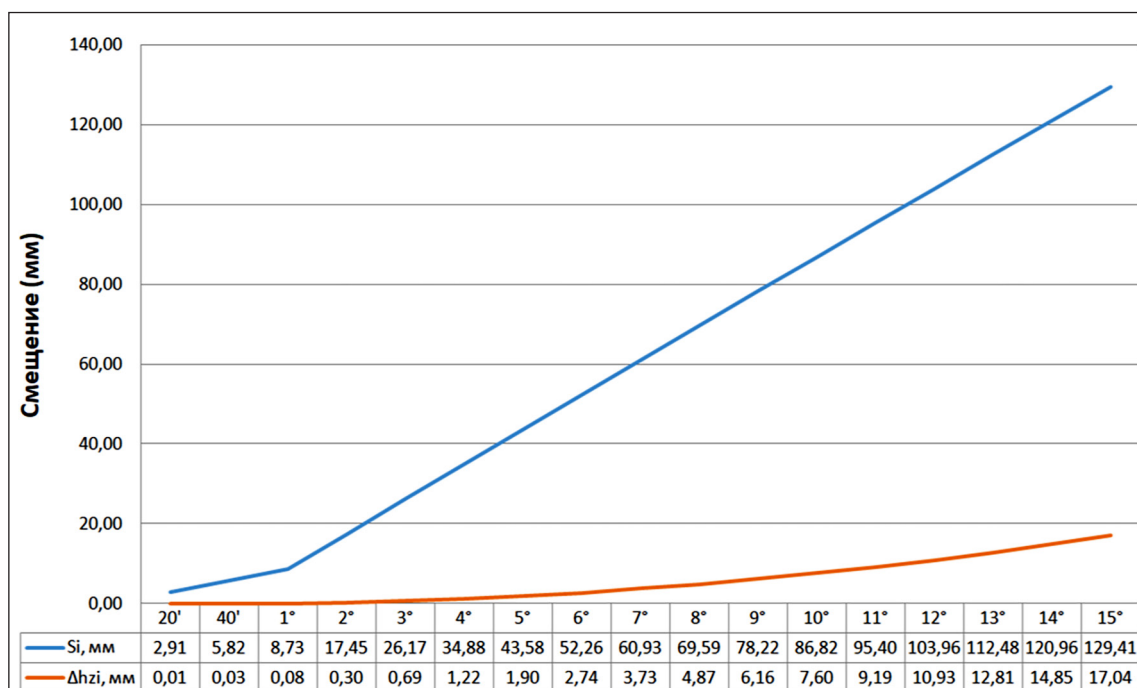


Рис. 3. Интенсивность горизонтального и вертикального смещения от угла наклона зонда инклинометра
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Таким образом, в условиях плоской задачи методика определения вертикальных смещений вертикальным скважинным инклинометром состоит в следующем:

- 1) установка инклинометрической скважины;
- 2) установка инклинометрического зонда в начало отсчета (забой или устье скважины);
- 3) проведение периодических измерений с заданным шагом вдоль вертикального профиля;
- 4) определение горизонтальных смещений;
- 5) определение вертикальных смещений;
- 6) интерпретация и анализ инклинометрических данных.

Используя выражение (1) для определения горизонтальных смещений (S_i) и выражение (5) для вертикальных смещений (Δh_{zi}) в отдельно взятом (i -м) инклинометрическом измерении, можно получить зависимость определяемых величин от угла наклона зонда инклинометра. На основании значений, приведенных на рис. 3, стоит отметить, что значение Δh_{zi} монотонно возрастает при увеличении угла наклона. При угле наклона зонда $\theta_i = 20'$ вертикальное смещение составляет 0,01 мм, а при угле наклона $\theta_i = 15^\circ$ смещение составило 17,04 мм. Закономерно, что значение вер-

тикального смещения возрастает со значительно меньшей интенсивностью, чем горизонтальное смещение.

Для верификации теоретических заключений были произведены практические измерения. Использовался экспериментально-практический инклинометрический стенд. Базой стенда является девятиметровая инклинометрическая скважина (трубка), которая подвергается локальному напряжению и искривлению, что обеспечивает движение зонда по искривленной оси. После снятия локальной нагрузки скважина возвращается в исходное состояние. Забой скважины углублен на полметра в грунт и закорен арматурной обвязкой на глубину ниже отметки промерзания грунта, обеспечивая стабильность нижней реперной зоны. Локальное напряжение, оказываемое на скважину, не превышает прочностных свойств скважины, тем самым допускается, что длина каждого звена постоянна.

При выполнении стендового эксперимента искажения скважины задавались в одной плоскости. Был спроектирован ряд траекторий движения инклинометрического зонда, после чего была рассмотрена серия траекторий из семи штук, имитирующих бочкообразную деформацию скважины с перегибом на отметке 5,5 м. В каждой траектории (вдоль оси скважины, от забоя

до устья) было выполнено два прохода зондом инклинометра в двух полуприемах, усредняя ошибку за место нуля в i -м измерении. Выполнено 18 последовательных измерений с шагом в 0,5 м в каждом полуприеме. Зонд инклинометра опускался в скважину на кабеле, на котором производителем установлены стальные цилиндрические маркеры с шагом в 0,5 м. Благодаря данным маркерам обеспечивалось подтверждение постоянства длин между измерениями при подъеме зонда от забоя до устья. Поскольку маркеры на кабеле установлены в заводских условиях с погрешностью $\pm 1\text{--}1,5$ мм, проскальзыванием зонда допускается пренебречь. Вращение скважины и отклонения ее от задаваемой траектории не зафиксированы, позволяя интерпретировать полученные данные в рамках плоской задачи. Для выполнения измерений применялся вертикальный цифровой инклинометр C17-PRO [14]. Результаты измерений были обработаны в специализированном программном обеспечении «In-Port Pro» (рис. 4, а).

Поскольку ПО «In-Port Pro» приводит графики инклинометрических измерений в наглядной форме, задавая масштабные коэффициенты, графоаналитическим методом были построены графики, отражающие физический характер деформаций (рис. 4, б).

Поскольку масштабные коэффициенты не применялись, стало возможным зафиксировать вертикальное смещение устья относительно забоя, возникшее из-за искривления скважины. Значения вертикальных и горизонтальных смещений на устье экспериментально-практического инклинометрического стенда, рассчитанные по выражениям (2), (6), приведены в таблице. Из приведенных данных прослеживается увеличение значения вертикального смещения (h_z) при увеличении степени искривленности скважины, что дает основание полагать, что существует зависимость накопления вертикальных смещений от степени искривленности скважины.

Для проверки значения вертикального смещения (h_z), полученного расчетом из инклинометрических данных, на устье скважины устанавливалась лазерная рулетка. В исходном положении скважины и при искривлении скважины и фиксации новой траектории лазерной рулеткой выполнялись засечки на поверхность стены здания, к которому прикреплен экспериментальный стенд. Расстояние между засечкой, соответствующей положению скважины в исходном положении, и засечкой, соответствующей положению скважины в искривленном положении, измерялось линейкой и означало вертикальное смещение ($\Delta h_{z(l.p.)}$) (таблица).

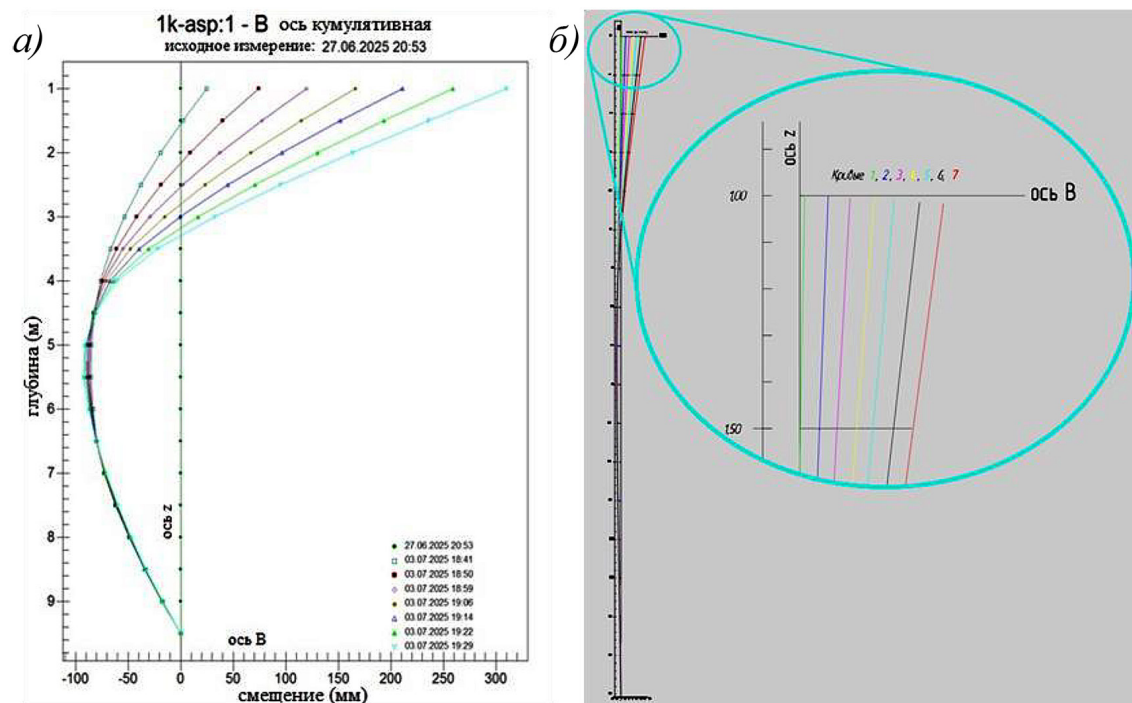


Рис. 4. Результаты инклинометрических измерений на стенде:

а) наглядная визуализация искривлений скважины;
б) физическая визуализация искривлений скважины

Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Горизонтальные и вертикальные смещения устья скважины относительно забоя

№ кривой	Кр. 1	Кр. 2	Кр. 3	Кр. 4	Кр. 5	Кр. 6	Кр. 7
S , мм	10,37	61,06	108,25	160,55	203,35	258,17	309,24
Δh_z , мм	0,46	3,43	6,68	7,17	10,39	15,47	20,58
$\Delta h_{z(p)}$, мм	0,0	4,0	7,0	7,0	11,0	17,0	24,5

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

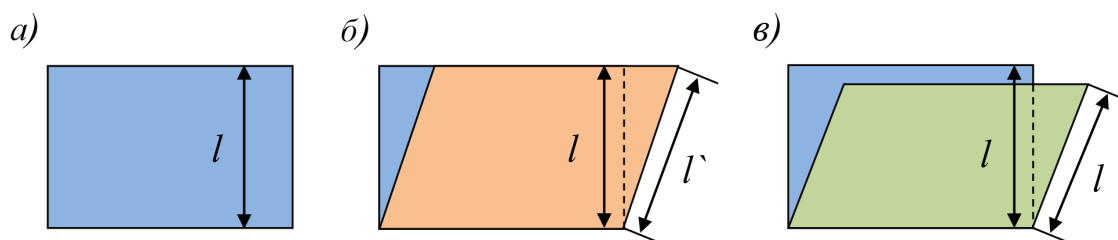


Рис. 5. Элемент конструкции: а) недеформированный блок конструкции; б) визуализация образования крена конструкции; в) визуализация образования крена и вертикального смещения конструкции
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Данная методика определения вертикального смещения имеет значительную долю погрешности, однако демонстрирует идентичность значений, полученных двумя методиками.

Геометрические построения (рис. 2, б) с практической точки зрения также могут объяснить возможные проблемы интерпретации инклинометрических данных при их интеграции в ТИМ-проект. На рис. 5, а, представлен элемент конструкции до возникших в нем деформаций. При возникновении крена возникает горизонтальное смещение верхней части конструкции относительно нижней (рис. 5, б), что фиксируется инклинометром и интегрируется в ТИМ-проект. Выходит, что высота исходного прямоугольника и высота параллелограмма равна, однако в действительности высота исходного прямоугольника равна боковой грани параллелограмма (рис. 5, в) из-за возникшего вертикального смещения.

Учитывая подобные аспекты, возможно применять косвенные результаты измерений для дублирования и резервирования систем мониторинга. В рассмотренном примере вертикальное смещение, полученное инклинометром, можно использовать для оценки сжимающих и растягивающих сил в конструкции. Таким образом, инклинометры могут быть временной заменой тензотрам при их отключении или выходе из строя. Альтернативным «нестандартным» применением инклинометров может быть оценка

образования и раскрытия трещин в конструкции, возникающих из-за тех же сжимающих и растягивающих сил, создающих неравномерные деформации.

В контексте вышесказанного стоит отметить, что дополненная методика измерений вертикальным скважинным инклинометром не изменилась в части полевых работ, а расширилась только в камеральной части, что является положительным фактором. Однако возникает вопрос о точностных характеристиках инклинометров и интерпретации инклинометрических данных [15; 16] и их взаимосвязи [17] для определения вертикальных смещений. Иначе говоря, для интеграции косвенных результатов измерений скважинным инклинометром и получения на их основании качественных характеристик состояния конструкции необходимы дополнительные исследования.

Выводы

При обработке и анализе полученных теоретических и практических данных были сформулированы следующие выводы:

- 1) разработанная методика позволяет определять вертикальные смещения вертикальным скважинным инклинометром;
- 2) при углах наклона менее 5° при шаге, равном 0,5 м, значения вертикальных смещений пренебрежимо малы;
- 3) интенсивность вертикальных смещенийкратно меньше горизонтальных;

4) значение вертикального смещения возрастает на протяженных траекториях;

5) значение вертикального смещения возрастает на траекториях со сложной геометрией (одна и более точек перегиба).

Из сформулированных выводов можно допустить возможность расширения эксплуатационных возможностей скважинного инклинометра при деформационном и структурном мониторинге, однако, вероятно, не для повсеместных задач, а для специальных. Из приведенных данных (рис. 3, таблица) можно сделать заключение, что вертикальные смещения, полученные скважинным инклинометром, целесообразно оценивать в высотных конструкциях. В частности, перспективно рассмотреть возможность включения подобных данных в систему геодезического мониторинга деформации сооружений на дамбах и высоконапорных гидроэлектростанциях.

Список литературы

1. Khubaib M., Alam A., Asghar Z. Integration of BIM and SHM For Sustainable Management of Existing Structures: A Systematic Review // *Fusion Journal of Engineering and Sciences*. DOI: 10.64615/fjes...2026.108.
2. Власов Р. О. ArchiSense. Интеллектуальные системы мониторинга зданий и сооружений. Теория, методы практика: Издательские решения, 2025. 314 с. ISBN 978-5-0067-5812-4.
3. Хиллер Б., Ямбаев Х. К. Разработка и натурные испытания автоматизированной системы деформационного мониторинга // *Вестник СГУГиТ*. 2016. № 1 (33). С. 48–61. EDN: WDHJQH.
4. Кривошеев К. В. Применение инклинометрического метода измерения при мониторинге вертикальности сооружения // *Инженерные изыскания в строительстве: материалы шестой Общероссийской научно-практической конференции молодых специалистов* (г. Москва, 25 апреля 2024 г.). М.: ООО «Геомаркетинг», 2024. С. 56–63. EDN: QJXKDS. ISBN 978-5-6050369-4-4.
5. Богов С. Г., Шашкин А. Г., Шашкин В. А. Обеспечение сохранности окружающей застройки при освоении подземного пространства в условиях слабых грунтов // *Геотехника*. 2022. Т. 14. № 1. С. 50–62. DOI: 10.25296/2221-5514-2022-14-1-50-62. EDN: OSVNJX.
6. Хиллер Б., Ли В. Т., Сухов И. В. Автоматизированная система деформационного мониторинга (АСДМ) на Саяно-Шушенской ГЭС // *Инженерная защита*. 2014. № 4 (4). С. 36–43. EDN: TMMGBT.
7. Ефанов Д. В., Осадчий Г. В., Седых Д. В., Барч Д. В. Организация непрерывного мониторинга углов наклона опор железнодорожной контактной сети // *Транспорт Урала*. 2017. № 2 (53). С. 37–41. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-2-37-41. EDN: YUNIWR.
8. Мозгачева О. А. Опыт проектирования и строительства защитных мероприятий в виде геотехнического барьера по методу компенсационного нагнетания // *Применение гидроразрывной технологии в практике строительства: материалы конференции* (г. Москва, 21 мая 2021 г.). С. 113–138. DOI: 10.37538/2713-1149-2022-113-138. EDN: HIMNJM.
9. Кудакеев Т. З. Автоматизированный геотехнический мониторинг потенциально опасных процессов в грунтовых массивах // *Путь и путевое хозяйство*. 2015. № 5. С. 29–33. EDN: UCDFOZ.
10. Устьян Н. А. Инклинометрические измерения осадок земляного полотна автомобильных и железных дорог // *Транспорт Урала*. 2019. № 3 (62). С. 9–13. DOI: 10.20291/1815-9400-2019-3-9-13. EDN: ZRVGYJ.
11. СП 305.1325800.2017 «Здания и сооружения. Правила проведения геотехнического мониторинга при строительстве» с Изменением № 1.
12. ASTM D6230-21E01, Standard Practices for Monitoring Earth or Structural Movement Using Inclinometers. ASTM International. 2021.
13. Jeng C. J., Yo Y. Y., Zhong K. L. Interpretation of slope displacement obtained from inclinometers and simulation of calibration tests // *Nat Hazards*. 2017. Vol. 87. Is. 2. P. 623–657. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11069-017-2786-6> (дата обращения: 15.05.2026). DOI: 10.1007/s11069-017-2786-6.
14. C17-PRO vertical digital inclinometer system manual. [Электронный ресурс]. URL: https://www.soilinstruments.com/datasheets/C17_PRO_Vertical_Digital_Inclinometer_System.pdf (дата обращения: 03.09.2026).
15. Васильев Г. А. Оценка точности и погрешности данных инклинометрии при геологическом моделировании с использованием компьютерных технологий // *Моделирование энергоинформационных процессов: сборник статей X национальной научно-практической конференции с международным участием* (г. Воронеж, 21–23 декабря 2021 г.). Воронеж: Воронежский государственный университет инженерных технологий, 2022. С. 34–37. EDN: ZDOWIN.
16. Кривошеев К. В. Сравнение результатов измерений горизонтальных смещений ограждающей конструкции котлована, полученных электронным тахеометром и скважинным инклинометром // *Вестник МИИГАиК: сборник научных статей по материалам 80-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Международная студенческая неделя науки СНН-2025* (г. Москва, 07–11 апреля 2025 г.). М.: Московский государственный университет геодезии и картографии, 2026. С. 285–295. EDN: YCXFNP.
17. Ganjalipour K. Review of Inclinometer Errors and Provide Correction Methods for Bias shift Error and Depth Position Error of the Probe // *Geotechnical and Geological Engineering*. 2021. Vol. 39. Is. 6. P. 4017–4034. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10706-021-01743-w#citeas> (дата обращения: 09.06.2026). DOI: 10.1007/s10706-021-01743-w. EDN: FJHAHZ.

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 621.396.96:537.312:551.34
DOI 10.17513/use.38548



CC BY 4.0

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗОН ОТТАЙКИ МЕРЗЛЫХ ПОРОД

¹Федоров В. Н. ORCID ID 0000-0003-1568-1737,

²Куляндин Г. А. ORCID ID 0000-0001-7029-0777

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова»,
Якутск, Российская Федерация, e-mail: fvnjgti@rambler.ru;

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Институт горного дела Севера имени Н. В. Черского» Сибирского отделения
Российской академии наук, Якутск, Российская Федерация

В 1986 г. при георадиолокационном зондировании палеолитической стоянки «Диринг-Юрях» (Центральная Якутия, возраст оценивается от 0,2 до 3 млн лет) впервые зафиксирован «эффект накопления электрического заряда» на контакте талых и мерзлых пород. Визуально он проявлялся как смещение отраженного импульса относительно нулевой отметки на экране радара. Для раскрытия физической природы этого явления выполнено численное электродинамическое моделирование зон с повышенной и пониженной проводимостью в рыхлых многолетнемерзлых отложениях. Расчеты основаны на методике дифференциальных ABCD-матриц, где малые фрагменты неоднородной дисперсионной среды с переменной электропроводностью представляются в виде передаточных матриц, выведенных напрямую из уравнений Максвелла. Дополнительно в релаксационную модель Дебая введен член, учитывающий высокочастотную проводимость, что позволило корректно описать поляризационные потери. Моделирование подтвердило, что заряд накапливается на границах раздела геологических сред – это обусловлено преобладанием низкочастотной гармоник спектра зондирующего сигнала в отраженном поле. Использование данной закономерности при обработке георадиолокационных данных дает возможность определять мерзлотное состояние горного массива и выявлять участки с талыми породами. Кроме того, открывается перспектива долговременного мониторинга криогенных процессов, активизирующихся при оттаивании пород под влиянием климатических факторов или техногенного воздействия.

Ключевые слова: электродинамическое моделирование, ABCD-матрица, уравнения Максвелла, георадиолокация, эффект накопления электрического заряда, формула Дебая, оттайка, мерзлые породы

Благодарности: Авторы выражают благодарность ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН за предоставленное научное оборудование для проведения исследований.

ELECTRODYNAMIC MODELING OF FROZEN ROCK DEFROST ZONES

¹Fedorov V. N. ORCID ID 0000-0003-1568-1737,

²Kulyandin G. A. ORCID ID 0000-0001-7029-0777

¹Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
“Northeastern Federal University named after M.K. Ammosov”, Yakutsk, Russian Federation,
e-mail: fvnjgti@rambler.ru;

²Federal State Budgetary Scientific Institution “Institute of Mining of the North named after N. V. Chersky”
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

For the first time, as a result of ground-penetrating radar (GPR) measurements in 1986 at the ancient human settlement “Diring-Yuryakh” in Central Yakutia (the age of the settlement is estimated from 0.2 to 3 million years), an “electric charge accumulation effect” was observed at the interface between thawed and frozen layers. This was observed as a deviation of the reflected signal from the zero axis on the GPR screen. To investigate the mechanism of this effect, electrodynamic modeling of zones of increased and decreased conductivity in frozen unconsolidated sediments was carried out. The calculations used the differential ABCD-matrix method, based on the representation of small sections of an inhomogeneous dispersive medium with different conductivities as transmission matrices obtained directly from Maxwell’s equations. Additionally, the concept of medium conductivity at high frequencies was added to the Debye formula to account for polarization losses. The modeling results confirmed the charge accumulation effect at the interfaces between media, due to the prevalence of low-frequency components of the probing signal spectrum in the reflected signal. Taking into account the established charge accumulation effect during the interpretation of GPR data allows for the assessment of the cryogenic state of the investigated rock mass and the identification of thawed rock zones. This opens up the possibility of conducting monitoring observations of the development of cryogenic processes in the rock mass, arising from thawing due to climatic conditions or anthropogenic impact.

Keywords: electrodynamic modeling, ABCD-matrix, Maxwell’s equations, electric charge accumulation effect, Debye formula, ground penetrating radar (GPR), thawing, frozen rocks

Acknowledgments: The authors are grateful to the Shared core facilities of the Federal Research Center YSC SB RAS for providing the scientific equipment used in this study.

Введение

В основе георадиолокации лежит регистрация отражений электромагнитных волн от границ, где электрические параметры среды (удельная проводимость или диэлектрическая проницаемость) претерпевают изменение [1, с. 24–28, 47–67]. Сверхширокополосные импульсы формируют электромагнитные волны, которые, проходя через толщу грунта, встречают на пути различные включения и слоистые неоднородности; отраженные от них сигналы улавливаются приемной антенной, после чего усиливаются, оцифровываются и поступают на компьютерную обработку. Каждое отражение образует на мониторе трассу, а их совокупность – георадиолокационный разрез (радарограмму). Таким образом, на экране формируется изображение, по которому судят о расположении и характере выявленных объектов.

Обработка радарограмм является сложной задачей. Поэтому к их анализу привлекается математическое моделирование, которое позволяет анализировать процесс формирования поля отраженных волн в среде, определять электромагнитные эффекты, обусловленные изменением электрофизических свойств, и др.

В настоящее время для электродинамического моделирования часто применяют метод конечных разностей во временной области (FDTD) [2; 3]. Есть и другие методы моделирования [4–6]. Отдельно можно выделить метод матриц линий передач (TLM) [7] и метод импедансного аналога пространства [8]. Однако упомянутые методы не учитывают или делают затруднительным учет дисперсии и поляризационных потерь в неоднородных средах, к тому же дополнительно требуют значительных вычислительных ресурсов, а использование рекурсивных методов расчета значительно увеличивает время вычислений. Указанных выше недостатков можно избежать, если применить дифференциальные ABCD-матрицы. Данный метод базируется на разбиении среды на элементарные фрагменты, каждый из которых описывается передаточной матрицей, сформированной на основе решений уравнений Максвелла. Сама вычислительная процедура реализуется через метод прямого счета [9, с. 162].

В 1986 г. сотрудниками лаборатории георадиолокации ИГДС СО РАН были проведены исследования стоянки древнего человека «Диринг-Юрх» в Центральной Якутии (возраст 0,2–3 млн лет), где на дан-

ных георадиолокации наблюдался эффект отклонения отраженного сигнала от нулевой оси. Тогда же В. Н. Федоровым было выдвинуто предположение, что это эффект накопления заряда на границе раздела талых и мерзлых пород.

Как было показано Н. О. Кожевниковым в публикации [10], аналогичные явления регистрировались при МПП-исследованиях (методом переходных процессов) в зонах многолетней мерзлоты (Аляска, Канада, Якутия). При этом наблюдались сигналы с немонотонным спадом и сменой знака ЭДС. Такое поведение переходных процессов было впоследствии обозначено [11] как эффект быстрой индукционно-вызванной поляризации (ВПИ) вмещающей среды.

Цель исследования – численное моделирование эффекта отклонения отраженного сигнала от нулевой оси и выявление на натурных данных георадиолокации накопления электрического заряда на границе раздела мерзлых и талых горных пород.

Материалы и методы исследования

Эффективность методов подповерхностной георадиолокации во многом определяется наличием адекватных моделей, связывающих характеристики измеряемых приборами отраженных радиосигналов с параметрами подстилающей поверхности.

Математическая модель дисперсионной среды. Основным параметром, характеризующим физическую среду для электромагнитных волн (ЭМВ) при подповерхностной георадиолокации, является комплексная диэлектрическая проницаемость, когда относительная комплексная магнитная проницаемость среды $\mu_r = 1$ [1]:

$$\hat{\epsilon} = \epsilon' - i\epsilon'', \quad (1)$$

где $\hat{\epsilon}$ – относительная комплексная диэлектрическая проницаемость, ϵ' – действительная (статическая) часть, связанная с накоплением энергии в диэлектрике приложенного поля, а ϵ'' – мнимая часть, связанная с потерями энергии в среде. Эти потери на частотах ниже 1 ТГц вызваны потерями на релаксацию ϵ_d и проводимость σ_{cm} [12, с. 108–118]:

$$\epsilon'' = \epsilon_d + \frac{\sigma_{cm}}{\omega\epsilon_0}, \quad (2)$$

где $\omega = 2\pi f$ – круговая частота, ϵ_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость.

Аномальная дисперсия почв, грунтов и горных пород связана с существованием нескольких релаксационных процессов [10] с различными временами релаксации. Чаще всего это связано с содержанием воды, которая и определяет частотную зависимость диэлектрических проницаемостей, диссипативных и поляризационных потерь [13].

Диэлектрическую релаксацию в мерзлых породах можно описать моделью Дебая [12, с. 114] с временем релаксации $\tau_{rel} \cong 100$ мкс [10]:

$$\varepsilon_d = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_{cm} - \varepsilon_\infty}{1 + i\omega\tau_{rel}}, \quad (3)$$

где ε_{cm} – диэлектрическая проницаемость среды на низких частотах; ε_∞ – значения диэлектрической проницаемости среды на высоких частотах.

Можно предположить, что быстро устанавливающаяся поляризация в мерзлых породах представляет собой диэлектрическую релаксацию льда, содержащегося в порах мерзлой породы [12, с. 142–157].

Эти явления можно объяснить эффектом Максвелла – Вагнера, когда в гетерогенных средах под действием электрического поля, направленного перпендикулярно границам между областями, отличающимися отношением диэлектрической проницаемости к удельной электропроводности, накапливаются заряды [10; 14]. Модель гетерогенной геологической среды, образованная непрерывной вмещающей фазой и овальными включениями приведена на рис. 1.

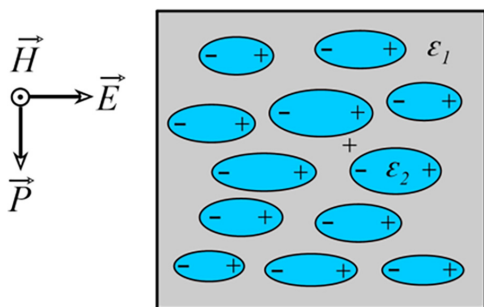


Рис. 1. Модель гетерогенной геологической среды, образованная непрерывной вмещающей фазой и овальными включениями

Примечание: составлен авторами на основе источников [10; 14]

Чтобы учесть в модели тепловые потери, потери на отражение и излучение, в вы-

ражении (2) введена проводимость σ_{cm} . При этом следует отметить, что при релаксационных потерях особое значение будет иметь проводимость среды на высоких и ультра-высоких частотах – σ_∞ [15]. В таком случае представить время релаксации τ_{rel} в соотношении Дебая можно как

$$\tau_{rel} = \varepsilon_0 (\varepsilon_{cm} - \varepsilon_\infty) / \sigma_\infty, \quad (4)$$

где ε_{cm} и ε_∞ – значения диэлектрической проницаемости среды на низких и высоких частотах соответственно, σ_∞ – проводимость среды на высоких частотах. Тогда получается, что если учесть релаксационные потери, то полную проводимость горной породы $\dot{Y}$ можно записать как

$$\dot{Y} = i\omega\varepsilon_0 \left(\varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_{cm} - \varepsilon_\infty}{1 + i\omega\tau_{rel}} \right) + \sigma_{cm}. \quad (5)$$

Для моделирования гетерогенной дисперсионной среды мерзлых и талых рыхлых отложений была разработана соответствующая математическая модель.

В этой модели принято допущение о том, что элементарный объем однородной среды $\Delta x \Delta y \Delta z$ стремится к бесконечно малым линейным размерам. Электродинамическая задача решается с помощью метода ABCD-матриц, где для каждой ячейки строится своя матрица передачи по стандартной схеме [16]. Чтобы реализовать этот подход, используют комплексные величины проводимости $\dot{Y}$ и сопротивления $\dot{Z}$ среды, определяемые формулами

$$\begin{aligned} \dot{Y} &= i\omega\varepsilon_0\dot{\varepsilon}, \\ \dot{Z} &= i\omega\mu_0\dot{\mu}. \end{aligned} \quad (6)$$

Тогда уравнения Максвелла для гармонических ЭМВ запишутся как [9]:

$$\begin{aligned} \text{rot} \vec{E} &= -\dot{Z} \vec{H}, \\ \text{rot} \vec{H} &= \dot{Y} \vec{E}. \end{aligned} \quad (7)$$

Постоянная распространения $\dot{\gamma} = \sqrt{\dot{Y}\dot{Z}}$ и волновое сопротивление $\dot{Z} = \sqrt{\dot{Z} / \dot{Y}}$, а затухание α и фазовая скорость V запишутся как

$$\begin{aligned} \alpha &= 8,686 \text{Re}(\gamma), \text{ дБ/м} \\ V &= \omega / \text{Im}(\gamma), \text{ м/с} \end{aligned} \quad (8)$$

Рассмотрим плоскую ЭМВ или Т-волну в однородной среде. Пусть Т-волна рас-

пространяется в направлении $\vec{z}$, а вектор электрического поля $\vec{E}$ параллелен орте $\vec{x}$. Учитывая, что для Т-волн

$$\partial \dot{E} / \partial z = 0, \partial \dot{H} / \partial z = 0$$

получим из (7) систему из двух однородных дифференциальных уравнений (ОДУ):

$$\begin{aligned} \frac{\partial \dot{E}_x}{\partial z} &= -\dot{Z} \dot{H}_y, \\ \frac{\partial \dot{H}_y}{\partial z} &= -\dot{Y} \dot{E}_x. \end{aligned} \quad (9)$$

Система ОДУ (9) описывает распространение Т-волны с линейной поляризацией в одномерной однородной среде.

Переходя к конечным разностям $dz \rightarrow \Delta z$, систему ОДУ (9), описывающую распространение ЭМВ в направлении увеличения координаты z , можно переписать следующим образом:

$$\begin{aligned} \dot{E}_x(z + \Delta z) &= \dot{E}_x(z) - \dot{Z} \cdot \Delta z \cdot \dot{H}_y(z), \\ \dot{H}_y(z + \Delta z) &= -\dot{Y} \cdot \Delta z \cdot \dot{E}_x(z) + \dot{H}_y(z). \end{aligned} \quad (10)$$

Соотношения (10) пересчитывают поля на элементарном участке слева направо, в направлении увеличения z (от z к $z + \Delta z$). Это дифференциальная матрица передачи ЭМВ участка среды мощностью Δz . Однако при построении итоговой матрицы передачи удобнее вести обратный пересчет – от правой границы к левой. Поэтому далее матрица участка вводится для пересчета полей справа налево (от $z + \Delta z$ к z). Тогда, в соответствии с теорией многополюсников [17], обратная дифференциальная АВ-

CD-матрица участка среды мощностью Δz запишется как

$$[a] = \begin{bmatrix} 1 & \dot{Z} \cdot \Delta z \\ \dot{Y} \cdot \Delta z & 1 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

При таком определении матрица (11) является обратной и позволяет последовательно пересчитывать поля от правой границы слоя ($z = L$) к левой ($z = 0$). Величина Δz должна быть много меньше длины волны исследуемого диапазона частот. Устойчивость и условие сходимости дифференциальной ABCD-матрицы (11) рассмотрены в работе [9].

Неоднородную одномерную среду мощностью h можно представить в виде каскадного соединения N ABCD-матриц слоев с различными $\dot{Y}_j$ и $\dot{Z}_j$, $j = 1, 2, \dots, N$. Для определения матрицы передачи $[a]^\Sigma$ такой среды достаточно перемножить ABCD-матрицы:

$$[a]^\Sigma = \prod_{j=1}^N [a]_j, \quad (12)$$

где $N = \lfloor h / \Delta z \rfloor$.

Тогда результирующую матрицу передачи многослойной неоднородной среды, связывающую поля на правой границе среды ($z = L$) с полями на левой границе ($z = 0$), можно записать как

$$\begin{cases} \dot{E}_x(0) = a_{11}^\Sigma \dot{E}_x(L) + a_{12}^\Sigma \dot{H}_y(L), \\ \dot{H}_y(0) = a_{21}^\Sigma \dot{E}_x(L) + a_{22}^\Sigma \dot{H}_y(L), \end{cases} \quad (13)$$

где $\dot{E}_x(0)\dot{E}_x(L)$ – амплитуда вектора электрического поля слева и справа от среды соответственно; $\dot{H}_y(0)\dot{H}_y(L)$ – амплитуда вектора магнитного поля слева и справа от среды соответственно.

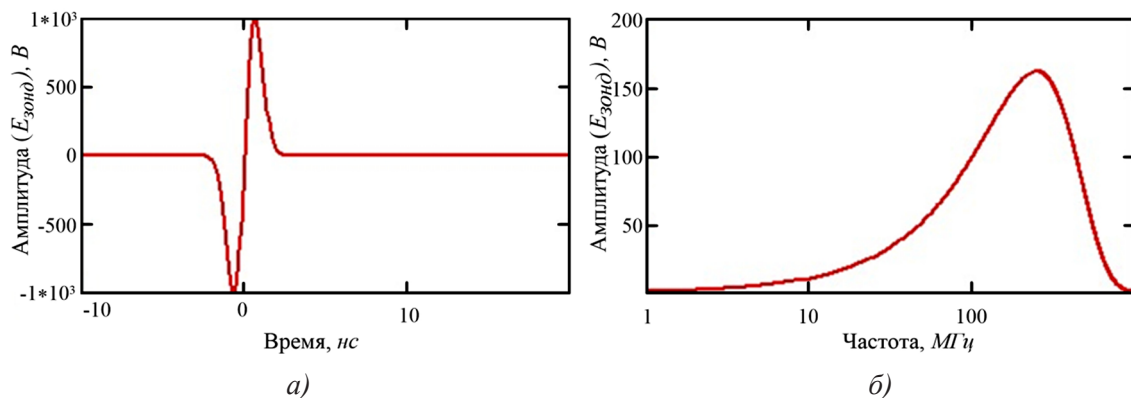


Рис. 2. Зондирующий импульс $E_{зонад}$ георадара серии «ОКО»: а) временная характеристика; б) амплитудно-частотная характеристика
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Была разработана программа, моделирующая процесс распространения видеоимпульса георадара серии «ОКО» с центральной частотой 250 МГц в слоистой дисперсионной среде (рис. 2).

Условия распространения Т-волн определяются граничными условиями слева и справа от среды:

$$\begin{aligned} \dot{E}_x(0) &= E_{\text{зонд}} - \dot{Z}_1 \dot{H}_y(0), \\ \dot{E}_x(L) &= \dot{Z}_2 \dot{H}_y(L), \end{aligned} \quad (14)$$

где $E_{\text{зонд}}$ – амплитуда зондирующего импульса; $Z_{1,2}$ – волновые сопротивления сред слева и справа от исследуемой среды соответственно.

Решая совместно (13) и (14), находим амплитуды магнитного $H_y(L)$ и электрического $E_x(L)$ полей справа:

$$H_y(L) = \frac{E_{\text{зонд}}}{a_{11}^{\Sigma} Z_2 + a_{12}^{\Sigma} + a_{21}^{\Sigma} Z_1 Z_2 + a_{22}^{\Sigma} Z_1}, \quad (15)$$

где a_{ij}^{Σ} – элементы результирующей матрицы $[a]^{\Sigma}$. Остальные амплитуды электрического и магнитного полей находим из (13) и (14).

Результаты исследования и их обсуждение

Адекватность предложенной модели проверялась путем расчетного моделирования с последующим сравнением с эталонными лабораторными измерениями, выполненными на различных образцах четвертичных отложений Центральной Якутии методом георадиолокации [18]. В этих опы-

тах изучалась зависимость скорости распространения ЭМВ от состояния мерзлости и влажности. Результаты показали, что все изученные породы демонстрируют значение коэффициента N_v , которое с относительным отклонением 4,3 % хорошо описывается линейным уравнением

$$N_v = \frac{V_M - V_T}{V_M} 100\% = 1.55W + c, \quad (16)$$

где V_M – скорость ЭМВ в мерзлом образце (0,150 м/нс); V_T – скорость ЭМВ в различных состояниях мерзлости, вплоть до полной оттайки образца; W – весовая влажность песка (3–22 %); c – поправочный коэффициент, зависящий от типа образца: для горного песка 0,3, для кварцевого – 11. Таким образом, скорость ЭМВ в талом горном песке снижается от 5 до 34 % в зависимости от влажности и от 15 до 45 % в речном песке.

Был рассчитан случай – речной песок, влажность 22 %. На рис. 3 приведены частотные зависимости затухания α и скорости распространения V ЭМВ в мерзлом и талом песках.

Расчеты показали, что с увеличением частоты потери α и фазовая скорость V ЭМВ в талых песках растет, при этом на низких частотах эти потери уменьшаются, как это показано на рис. 3, а. На рис. 3, б, приведена частотная зависимость скорости ЭМВ в талом и мерзлом песках. Наблюдается хорошее соответствие расчета с экспериментальными данными, что подтверждает эквивалентность математической модели и экспериментальных результатов.

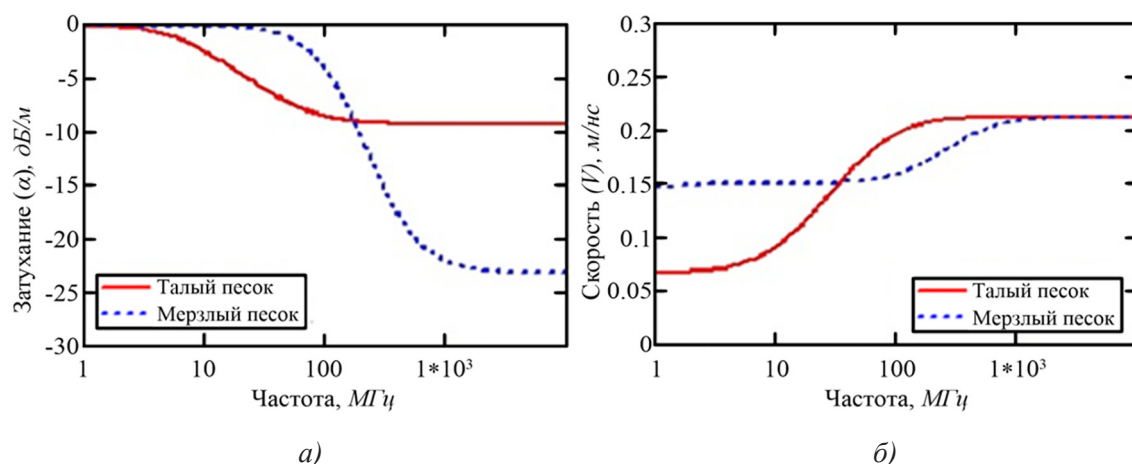


Рис. 3. Частотная зависимость затухания α (а) и скорости распространения V (б) ЭМВ в мерзлом и талом речном песке с влажностью 22 %

Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

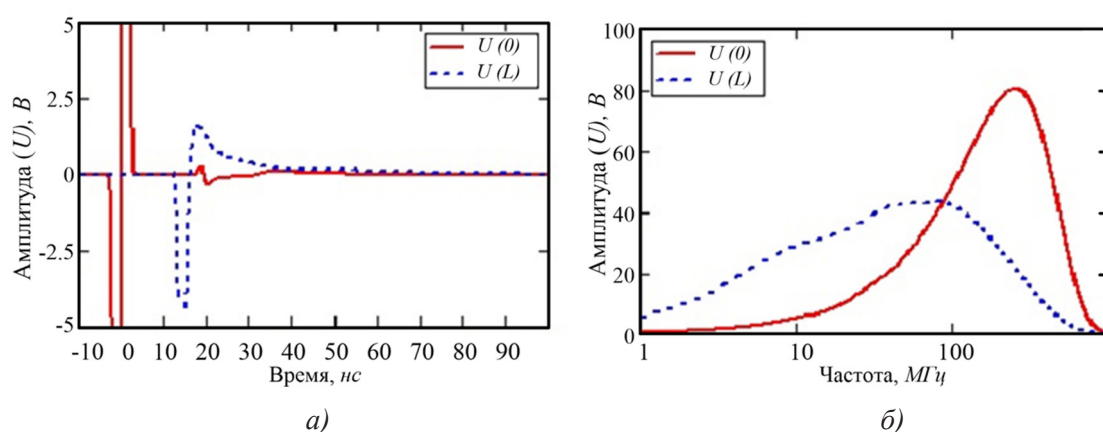


Рис. 4. Отраженный сигнал $U(x)$ георадара: а) в начале при $x = 0$ и в конце талого слоя при $x = L$; б) амплитудно-частотная характеристика сигнала в начале и конце талого слоя
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

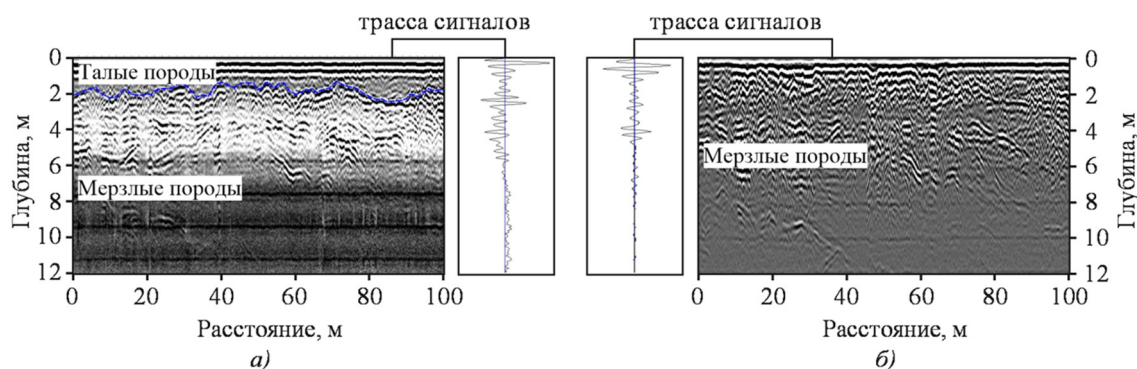


Рис. 5. Георадарные данные сезонных наблюдений: в летнее время (а) и зимой (б)
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Рассчитывалось распространение видеоимпульса в образце мерзлого песка, состоящего из сезонно-талого слоя мощностью 2 м и мерзлого слоя. На рис. 4, а, приведены отраженные сигналы $U(x)$ георадара на границе воздух – талый грунт при $x = 0$ и на границе талый грунт – мерзлый грунт при $x = L$. На георадарной трассе наблюдается отклонение сигнала от нулевой оси в положительную сторону на границе талого и мерзлого слоев (в диапазоне 15–35 нс). На рис. 4, б, приведены амплитудно-частотные характеристики этих сигналов. На них можно заметить сильное поглощение высокочастотных составляющих зондирующего сигнала (синяя пунктирная линия свыше 100 МГц). Отклонение в положительную или отрицательную сторону по шкале амплитуд на рис. 4, а, определяется поляризацией вектора E зондирующего импульса. Это отклонение вызвано более сильной поляризацией талого слоя под действием внешнего электрического поля, чем

мерзлого слоя, что зависит от величин σ_∞ и ϵ_∞ . Можно предположить, что в талом слое происходит накопление электрического заряда на время $\tau_{\text{рел}}$. Отметим, что на скорость распространения отраженного сигнала влияет проводимость слоев, при этом σ_∞ влияет больше, чем $\sigma_{\text{ст}}$.

Для сравнения на рис. 5 представлены экспериментальные радарограммы, полученные георадаром «ОКО-3» с антенной 250 МГц. Георадиолокация выполнена вдоль борта карьера на месторождении песка «Хатынг-Юряхское» в Центральной Якутии в летнее и зимнее время.

На участке исследований по летним данным выделяется слой сезонно-талых пород на глубине около 2 м. Граница между талыми и мерзлыми породами (обозначена синей прерывистой линией) выделяется на радарограмме по высокоамплитудным сигналам, образующим оси синфазности на контрастных по электрофизическим свойствам породах. На этой границе

(рис. 5, а) возникает описанный выше «эффект накопления заряда». Наблюдать его можно по отклонению сигналов от нулевой оси на георадиолокационной трассе. Волновая картина при этом имеет характерную раскраску в виде темных и светлых полос, маскирующих отраженные сигналы на радараграмме. Связано это с преобладанием низкочастотной составляющей в спектре трассы отраженных сигналов. В случае, когда горные породы полностью заморожены и их электрофизические характеристики распределены равномерно по всей толще, сигналы-отражения имеют малые амплитуды, а отклонения сигналов от нулевой оси не происходит (рис. 5, б).

Заключение

Моделирование данных георадиолокации, полученных на образцах четвертичных пород Центральной Якутии с разной степенью мерзлости, подтвердило наличие поляризационного эффекта между слоями горных пород, отличающихся по электропроводности. Данный эффект, обусловленный механизмом Максвелла – Вагнера, проявляется на радараграммах как смещение сигнала относительно нулевой линии при переходе ЭМВ из проводящей в диэлектрическую среду. Одновременно с этим в частотном спектре отраженного импульса преобладает низкочастотная компонента, что связано с диэлектрическими потерями релаксационного типа, описываемыми моделью Дебая. Сопоставление с натурными георадиолокационными измерениями на участке с сезонно-талым слоем показывает, что учет этого поляризационного явления при обработке и интерпретации радараграмм дает возможность достоверно определять криогенное состояние массива и локализовать участки с талыми породами. Также появляется перспектива мониторинга динамики криогенных процессов, активизирующихся при оттаивании под влиянием природно-климатических факторов или антропогенных нагрузок.

Список литературы

1. Владов М. Л., Судакowa М. С. Георадиолокация. От физических основ до перспективных направлений. М.: ГЕОС, 2017. 240 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://geos-books.ru/vladov-m-l-sudakova-m-s-georadiolokac> (дата обращения: 07.09.2026).
2. Bricheva S., Schennen S., Stanilovskaya J. Prospects of the FDTD modeling tool gprMax for imaging of ice wedges // 2017 9th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR). Edinburgh, UK, 2017. P. 1–5. [Электронный ресурс]. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7996093> (дата обращения: 05.08.2026).

3. Wu C., Zheng K., Sun X., Qin S., An K. Magnetic field iterative equation in 2D unconditionally stable FDTD // 2020 Cross Strait Radio Science & Wireless Technology Conference (CSR-SWTC). Fuzhou, China, 2020. P. 1–3. [Электронный ресурс]. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9372642> (дата обращения: 05.08.2026).
4. Кожевников Н. О., Антонов Е. Ю. Индукционно-вызванная поляризация и оценка ее проявления с помощью нормированных переходных характеристик // Геология и геофизика. 2020. Т. 61. № 10. С. 1428–1444. URL: <http://www.ipgg.sbras.ru/science/publications/publ-induktsionno-vyzvannaya-polyarizatsiya-i-otsenka-1014281444-2020> (дата обращения: 05.08.2026).
5. Sandström S.-E., Akeab I. K. Accurate hybrid techniques for the method of moments in 2D // International Journal of Electronics and Communications. 2016. Vol. 70. Is. 5. P. 539–543. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1434841116300334> (дата обращения: 05.08.2026).
6. Bernhardt M. P., Hanke M., van der Vegt N. F. A. Iterative integral equation methods for structural coarse-graining // The Journal of Chemical Physics. 2021. Vol. 154. Is. 8. P. 084118. URL: <https://www.numerik.mathematik.uni-mainz.de/files/2021/02/JCP20-AR-04687.pdf> (дата обращения: 05.08.2026).
7. Wen Q. Y., Xie Y. S., Zhang H. W., Yang Q. H., Li Y. X., Liu Y. L. Transmission line model and fields analysis of metamaterial absorber in the terahertz band // Opt Express. 2009. Vol. 17. Is. 22. P. 20256–20265. URL: https://www.researchgate.net/publication/40484066_Transmission_line_model_and_fields_analysis_of_metamaterial_absorber_in_the_terahertz_band (дата обращения: 05.08.2026).
8. Иванов С. А., Сестрорецкий Б. В. Метод импедансного аналога пространства для двумерных задач электродинамики // Журнал радиоэлектроники. 2007. № 5. С. 2. URL: <http://jre.cplire.ru/win/may07/2/text.html> (дата обращения: 05.08.2026).
9. Федоров В. Н., Федорова Л. Л., Малютин Н. Д. Электродинамическое моделирование неоднородных сред методом дифференциальных ABCD-матриц // VIII Международная конференция по математическому моделированию: тезисы докладов / Под ред. докт. физ.-мат. наук И. Е. Егорова, докт. физ.-мат. наук С. В. Попова. Якутск: Издательский дом СВФУ, 2017. 218 с. [Электронный ресурс]. URL: https://www.s-vfu.ru/universitet/nauka/mkmm/mkmm2017/downloads/Book%20of%20abstracts_ICMM-2017.pdf (дата обращения: 07.09.2026).
10. Кожевников Н. О. Быстропротекающая индукционно-вызванная поляризация в мерзлых породах // Геология и геофизика. 2012. Т. 53. № 4. С. 527–540. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17668723> (дата обращения: 05.08.2026).
11. Кожевников Н. О. Вызванная межповерхностная поляризация и ее проявления в электроразведке // Геология и геофизика. 2025. Т. 66. № 7. С. 922–928. URL: <http://www.ipgg.sbras.ru/science/publications/publ-vyzvannaya-mezhpoverkhnostnaya-polyarizatsiya-i-7922928-2025> (дата обращения: 05.08.2026).
12. Фролов А. Д. Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов. Пущино: ОНТИ ПНЦ РАН, 1998. 515 с.
13. Belyaeva T. A., Bobrov P. P., Kroschka E. S., Repin A. V. Complex dielectric permittivity of saline soils and rocks at frequencies from 10 kHz to 8 GHz // 2017 Progress In Electromagnetics Research Symposium – Spring (PIERS). St. Petersburg, Russia, 2017. P. 3046–3051. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8262278> (дата обращения: 05.08.2026).
14. Каравайский А. Ю., Лукин Ю. И. Влияние связанной воды на температурную зависимость частотных спектров диэлектрической проницаемости влажных почв: материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2022. С. 306. [Электронный ресурс]. URL: <http://conf.rse.geosmis.ru/files/books/2022/9098.htm> (дата обращения: 05.08.2026).

15. Федоров В. Н., Федорова Л. Л., Соколов К. О. Двухмерная электродинамическая модель неоднородной среды с потерями // Успехи современного естествознания. 2018. № 10. С. 132–137. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=36894> (дата обращения: 05.08.2026).

16. Subramanian S., Packirisamy T., Mahalingam M., et al. Scattering coefficients and path gain of a multilayer tissue structure using ABCD matrix method // Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing. 2021. Vol. 12. P. 6399–6406. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12652-020-02244-z> (дата обращения: 05.08.2026).

17. Обуховец В. А. Синтез симметричных СВЧ-многополосников // Известия ЮФУ. Технические науки. 2018. № 7 (201). С. 177–185 URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sintez-simmetrichnyh-svch-mnogopolyusnikov> (дата обращения: 05.08.2026).

18. Федорова Л. Л., Федоров М. П., Кулядин Г. А., Саввин Д. В. Георадиолокационные исследования оттайки мерзлых горных пород в лабораторных условиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 5. С. 99–111. URL: https://www.giab-online.ru/uploads/archives/213/1620799744609b7100143956.49126472_ru.pdf (дата обращения: 05.08.2026).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRS-2026-0052, рег. № 1025031700046-3-1.5.1).

Financing: The work was performed within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic № FWRS-2026-0052, Registration number 1025031700046-3-1.5.1).