



ИД «Академия Естествознания»

УСПЕХИ СОВРЕМЕННОГО ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

Научный журнал

№ 11 2025



ADVANCES IN CURRENT NATURAL SCIENCES

Scientific journal

No. 11 2025



PH Academy of Natural History

Успехи современного естествознания

Научный журнал

Журнал издается с 2001 года.

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

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

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

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

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

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

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

Технический редактор

Доронкина Е.Н.

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ

Бизенкова Мария Николаевна, к.м.н.

Корректор

Галенкина Е.С.,

Дудкина Н.А.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

ISSN 1681-7494

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

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

Двухлетний импакт-фактор РИНЦ = 0,976

Пятилетний импакт-фактор РИНЦ = 0,458

Периодичность	12 номеров в год		
Учредитель, издатель и редакция	ООО ИД «Академия Естествознания»		
Почтовый адрес	105037, г. Москва, а/я 47		
Адрес редакции и издателя	440026, обл. Пензенская, г. Пенза, ул. Московская, влад. 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	28.11.2025	Дата выхода номера	30.12.2025
Формат	60x90 1/8	Усл. печ. л.	14
Тираж	1000 экз.	Заказ	УСЕ 2025/11

Распространяется по свободной цене

© ООО ИД «Академия Естествознания»

Advances in current natural sciences

Scientific journal

The journal has been published since 2001.

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

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

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

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

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

CHIEF EDITOR

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

Technical editor

Doronkina E.N.

EXECUTIVE SECRETARY

Bizenkova Maria Nikolaevna, Cand. Sci. (Medical)

Corrector

Galenkina E.S.,
Dudkina N.A.

EDITORIAL BOARD

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

ISSN 1681-7494

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

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

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

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

Periodicity	12 issues per year		
Founder, publisher and editors	LLC PH Academy of Natural History		
Mailing address	105037, Moscow, p.o. box 47		
Editorial and publisher address	440026, Penza region, Penza, Moskovskaya st., bldg. 27		
Printing house	LLC SPC Academy of Natural History		
	410035, Saratov, st. Mamontova, 5		
E-mail	edition@rae.ru	Telephone	+7 (499) 705-72-30
Signed for print	28.11.2025	Number issue date	30.12.2025
Format	60x90 1/8	Conditionally printed sheets	14
Circulation	1000 copies	Order	YCE 2025/11

Distribution at a free price

© LLC PH Academy of Natural History

СОДЕРЖАНИЕ

Сельскохозяйственные науки (4.1.1 Общее земледелие и растениеводство)

СТАТЬЯ

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ УСТОЙЧИВЫХ И ВОСПРИИМЧИВЫХ СОРТОВ ПШЕНИЦЫ МЯГКОЙ ЯРОВОЙ К ЛИСТОСТЕБЕЛЬНЫМ ПАТОГЕНАМ В ОМСКОЙ ОБЛАСТИ

Белан И.А., Рассеева Л.П., Гайдар А.А., Кузьмина Е.С., Пахотина И.В., Зырянов Б.В. 8

Географические науки (1.6.8, 1.6.12, 1.6.13, 1.6.21)

СТАТЬИ

РЕЗУЛЬТАТЫ ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ ТЕРРИТОРИИ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ОКРУГА

Алексеев И.А. 15

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВЕРХОВЫХ БОЛОТ ЛЕСОСТЕПНОЙ ЗОНЫ (НА ПРИМЕРЕ БОЛОТА НИКОЛЬСКОЕ ПЕНЗЕНСКОЙ ОБЛАСТИ)

Артемова С.Н., Сидоров Н.В. 22

ПРОЦЕДУРА ВНЕСЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ В ГЕНЕРАЛЬНЫЙ ПЛАН МУНИЦИПАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

Архипова В.С., Ларина А.В., Тарасова О.Ю., Келин Е.Н., Скобликова А.В. 30

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ЛАНДШАФТНОЙ СТРУКТУРЫ СЕЛЬСКИХ И ГОРОДСКИХ ПОСЕЛЕНИЙ ЦЕНТРАЛЬНО-ЧЕРНОЗЕМНОЙ ЗОНЫ РОССИИ (НА ПРИМЕРЕ БЕЛГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ)

Дроздова Е.А., Титов Б.О., Гененко М.А. 37

ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ДИНАМИКИ КЛИФА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ И ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ (НА ПРИМЕРЕ БЕРЕГОВОЙ ЗОНЫ ТАГАНРОГСКОГО ЗАЛИВА)

Мисиров С.А. 44

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ СУММАРНОГО КОЭФФИЦИЕНТА РОЖДАЕМОСТИ В ЦЕНТРАЛЬНОМ ФЕДЕРАЛЬНОМ ОКРУГЕ

Яковенко Н.В., Гурченко В.И. 51

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

СТАТЬИ

ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПЛОДОРОДИЯ И УСТОЙЧИВОСТИ ПОЧВ САДОВО-ПАРКОВЫХ ТЕРРИТОРИЙ ЦЕНТРАЛЬНОГО РАЙОНА САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

Брянцев А.В. 57

ИДЕНТИФИКАЦИЯ КОМПОНЕНТОВ ФОРМИРОВАНИЯ
СТОКА ИЛЛОССКОГО БОЛОТНОГО МАССИВА НА ОСНОВЕ
ИЗОТОПНЫХ ДАННЫХ ($\delta^{2\text{H}}$ – $\delta^{18\text{O}}$)

Лизунова М.А., Яковлев Е.Ю., Чупаков А.В., Прасолов С.Д., Токарев И.В. 64

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

СТАТЬИ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА НАСЫПИ
АВТОДОРОГИ И ГРУНТОВ ОСНОВАНИЙ В УСЛОВИЯХ
МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ ЯКУТИИ

Малышев А.В., Тимофеев А.М., Большев К.Н., Цеева А.Н. 71

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ КОМПЛЕКСНОГО ПРИМЕНЕНИЯ
ЭЛЕКТРОРАЗВЕДОЧНЫХ МЕТОДОВ ПРИ ВЫЯВЛЕНИИ
ТАЛИКА В МАССИВЕ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД
ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ

Саввинов И.И., Кул яндин Г.А. 79

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕАНАЛИЗА
ДЛЯ ОЦЕНКИ СТОКА РЕКИ БУРЕЯ

Федоровский А.С., Бортин Н.Н., Кролевецкая Ю.В., Костык В.А. 87

СОЗДАНИЕ 3Д-МОДЕЛИ ОБЪЕКТА КАПИТАЛЬНОГО
СТРОИТЕЛЬСТВА НА ПРИМЕРЕ ТОРГОВО-РАЗВЛЕКАТЕЛЬНОГО
ЦЕНТРА «КРАСНАЯ ПЛОЩАДЬ» В Г. КРАСНОДАР

Солодунов А.А., Пшидаток С.К., Шичиях З.З. 94

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

СТАТЬЯ

ПРИМЕНЕНИЕ ВОЗДУШНОГО И НАЗЕМНОГО ЛИДАРНОГО
СКАНИРОВАНИЯ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РАБОТ ПО ОТВОДУ
И ТАКСАЦИИ ЛЕСОСЕК

Банников В.П., Капиталинин Д.Ю., Карминов В.Н., Митрофанов Е.М., Фань Вэнъи 102

CONTENTS

Agricultural Sciences (4.1.1 General Agriculture and Plant Growing)

ARTICLE

A COMPARATIVE ANALYSIS OF RESISTANT AND SUSCEPTIBLE SPRING WHEAT VARIETIES TO LEAF-STEM PATHOGENS IN THE OMSK REGION

Belan I.A., Rosseeva L.P., Gaidar A.A., Kuzmina E.S., Pakhotina I.V., Zyryanov B.V. 8

Geographical sciences (1.6.8, 1.6.12, 1.6.13, 1.6.21)

ARTICLES

RESULTS OF PHYSICAL AND GEOGRAPHICAL ZONING OF THE TERRITORY OF THE FAR EASTERN FEDERAL DISTRICT

Alekseev I.A. 15

GEOECOLOGICAL ANALYSIS AND ASSESSMENT OF THE ECOLOGICAL STATE OF THE UPPER MARSHES OF THE FOREST-STEPPE ZONE (ON THE EXAMPLE OF THE NIKOLSKOYE SWAMP OF THE PENZA REGION)

Artemova S.N., Sidorov N.V. 22

PROCEDURE FOR AMENDING THE GENERAL PLAN OF A MUNICIPALITY

Arhipova V.S., Larina A.V., Tarasova O.Yu., Kelin E.N., Skoblikova A.V. 30

ASSESSMENT OF LANDSCAPE STRUCTURE CHANGES IN OLD-ESTABLISHED RURAL AND URBAN SETTLEMENTS OF CENTRAL CHERNOZEM RUSSIA (CASE STUDY OF BELGOROD REGION)

Drozdova E.A., Titov B.O., Genenko M.A. 37

ASSESSMENT OF SPATIAL AND TEMPORAL DYNAMICS OF SEA CLIFFS BASED ON REMOTE SENSING DATA AND GEOINFORMATION SYSTEMS (ON THE EXAMPLE OF THE COASTAL ZONE OF THE TAGANROG BAY)

Misirov S.A. 44

SPATIAL VARIATION OF THE TOTAL FERTILITY RATE IN THE CENTRAL FEDERAL DISTRICT

Yakovenko N.V., Gurchenko V.I. 51

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

ARTICLES

INTEGRATED ASSESSMENT OF SOIL FERTILITY AND SUSTAINABILITY IN GARDEN AND PARK TERRITORIES OF THE CENTRAL DISTRICT OF SAINT-PETERSBURG

Bryantsev A.V. 57

IDENTIFICATION OF RUNOFF COMPONENTS OF FORMATION
OF THE ILAS BOG MASSIF BASED ON ISOTOPE DATA ($\delta^{2\text{H}}$ – $\delta^{18\text{O}}$)

Lizunova M.A., Yakovlev E.Yu., Chupakov A.V., Prasolov S.D., Tokarev I.V. 64

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

ARTICLES

MODELING THE TEMPERATURE REGIME OF ROAD
EMBANKMENT AND SOILS BASED ON PERMAFROST
CONDITIONS IN YAKUTIA

Malyshev A.V., Timofeev A.M., Bolshev K.N., Tseeva A.N. 71

ASSESSMENT OF THE CAPABILITIES OF INTEGRATED
ELECTRICAL PROSPECTING METHODS FOR DETECTING
TALIKS IN PERMAFROST MASSIFS OF CENTRAL YAKUTIA

Savvinov I.I., Kulyandin G.A. 79

USING HYDROLOGICAL REANALYSIS TO ASSESS THE RUNOFF
OF THE BUREYA RIVER

Fedorovskiy A.S., Bortin N.N., Krolevetskaya Y.V., Kostyk V.A. 87

CREATION OF A 3D MODEL OF A CAPITAL CONSTRUCTION
FACILITY USING THE EXAMPLE OF THE RED SQUARE
SHOPPING CENTER IN KRASNODAR

Solodunov A.A., Pshidatok S.K., Shichiyakh Z.Z. 94

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

ARTICLE

THE USE OF AERIAL AND GROUND-BASED LIDAR
SCANNING DURING LOGGING AND TAXING OPERATIONS

Bannikov V.P., Kapitalinin D.Yu., Karminov V.N., Mitrofanov E.M., Fan Wenyi 102

СТАТЬИ

УДК 631.527:633.11:632.4(571.13)
DOI 10.17513/use.38445

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ УСТОЙЧИВЫХ И ВОСПРИИМЧИВЫХ СОРТОВ ПШЕНИЦЫ МЯГКОЙ ЯРОВОЙ К ЛИСТОСТЕБЕЛЬНЫМ ПАТОГЕНАМ В ОМСКОЙ ОБЛАСТИ

Белан И.А. ORCID ID 0000-0002-8911-4199, Рассеева Л.П. ORCID ID 0000-0002-5885-4020,
Гайдар А.А. ORCID ID 0000-0002-6391-1149, Кузьмина Е.С. ORCID ID 0000-0002-0882-6101,
Пахотина И.В., Зырянов Б.В. ORCID ID 0009-0006-9268-4076

*Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Омский АНЦ»,
Омск, Российская Федерация, e-mail: boriska_zyryanov@mail.ru*

Одним из направлений в селекции яровой мягкой пшеницы на повышение урожайности и качества зерна является создание и внедрение в производство сортов, устойчивых к грибным заболеваниям. Целью исследований было сравнение урожайности и стабильности устойчивых и восприимчивых к листостебельным патогенам сортов пшеницы в условиях южной лесостепи Омской области. Вычисляли параметры экологической стабильности изучаемых сортов: реализацию потенциала продуктивности, фактор стабильности, степень депрессии урожая. Проведено сравнение устойчивых и восприимчивых сортов разных групп спелости яровой мягкой пшеницы к листостебельным заболеваниям при изучении в течение десяти лет в условиях южной лесостепи Омской области. За годы исследований сорт Тарская юбилейная, Омская 44 и Омская 42 характеризуются повышенной, а восприимчивые сорта Памяти Азизова, Дуэт и Омская 18 слабой устойчивостью к стрессовым факторам среды. Из десяти лет изучения семь были эпифитотийными. В эти годы, независимо от группы спелости, отмечена повышенная урожайность устойчивых сортов. В засушливые годы разница по урожайности была не существенной, за исключением среднераннего сорта Тарская юбилейная, который достоверно превысил стандарт Памяти Азизова. Сопряженность между началом эпифитотий на растениях и урожайностью, показателями качества зерна выявила, что чем более поздний период поражения растений возбудителями, тем выше урожайность, масса тысячи зерен, натура и концентрация белка в зерне. По результатам комплексной оценки адаптивности и стабильности устойчивые сорта по урожайности характеризовались более низкой вариабельностью, повышенной реализацией потенциала продуктивности, оптимальными значениями фактора стабильности, генетической гибкости и депрессии. Таким образом, сорт Тарская юбилейная, Омская 44 и Омская 42 являются одним из резервов валовых сборов, стабилизации зернового хозяйства, а также ценным генетическим материалом при селекции на устойчивость и продуктивность в условиях Западной Сибири.

Ключевые слова: Омская область, сорт, урожайность, листостебельные патогены, устойчивость, стабильность

A COMPARATIVE ANALYSIS OF RESISTANT AND SUSCEPTIBLE SPRING WHEAT VARIETIES TO LEAF-STEM PATHOGENS IN THE OMSK REGION

Belan I.A. ORCID ID 0000-0002-8911-4199, Rosseeva L.P. ORCID ID 0000-0002-5885-4020,
Gaidar A.A. ORCID ID 0000-0002-6391-1149, Kuzmina E.S. ORCID ID 0000-0002-0882-6101,
Pahotina I.V., Zyryanov B.V. ORCID ID 0009-0006-9268-4076

*Federal State Budgetary Scientific Institution Omsk ANTS,
Omsk, Russian Federation, e-mail: boriska_zyryanov@mail.ru*

One of the areas of spring soft wheat breeding aimed at increasing yield and grain quality is the development and introduction of varieties resistant to fungal diseases. The aim of the study was to compare the yield and stability of wheat varieties resistant and susceptible to leaf-stem pathogens in the southern forest-steppe conditions of the Omsk region. Parameters of the environmental stability of the studied varieties were calculated: the realization of productivity potential, the stability factor, and the degree of yield depression. A comparison of resistant and susceptible spring wheat varieties of different maturity groups to leaf-stem diseases was conducted during a ten-year study in the southern forest-steppe of the Omsk Region. Over the years of research, the Tarskaya Yubileinaya, Omskaya 44 and Omskaya 42 varieties have been shown to have increased resistance to environmental stress factors, while the susceptible Pamyati Aziev, Duet and Omskaya 18 varieties have shown weak resistance. Of the ten years of study, seven experienced epiphytotics. During these years, increased yields were observed in the resistant varieties, regardless of maturity group. In drought years, yield differences were insignificant, with the exception of the mid-early Tarskaya Yubileinaya variety, which significantly exceeded the Pamyati Aziev standard. A correlation between the onset of epiphytotics on plants and yield and grain quality indicators revealed that the later the period of plant infestation by pathogens, the higher the yield, thousand-kernel weight, natural weight, and protein concentration in grain. A comprehensive assessment of adaptability and stability revealed that the resistant varieties were characterized by lower yield variability, increased productivity potential, and optimal values for stability, genetic flexibility, and depression. Thus, the Tarskaya Yubileinaya, Omskaya 44, and Omskaya 42 varieties are a reserve for gross harvests, stabilizing grain production, and valuable genetic material for breeding for resistance and productivity in Western Siberian conditions.

Keywords: Omsk Region, variety, yield, leaf-stem pathogens, resistance, stability

Введение

Пшеница представляет особую ценность для производства продовольственного зерна в Сибири. Создание устойчивых сортов является одним из перспективных направлений в селекции – экологически безопасный способ защиты пшеницы от болезней. Для успешной иммуногенетической защиты большую значимость представляет разнообразие выращивания генетически разнородных по генам устойчивости сортов в регионах. Сорта однородные по генам быстро теряют эффективность: ген Lr26 на Северном Кавказе в 1970 годах, ген Lr19 в Поволжье в 1990 годах и ген Lr9 в Западной Сибири и на Урале в 2000-х годах [1-3]. В Западной Сибири в 2015 г. стеблевая ржавчина стала одной из основных болезней, вследствие чего отмечалось заметное снижение не только урожайности, но и качества зерна [4]. В связи с этим проводится изучение и обмен перспективным селекционным материалом между учреждениями, одно из которых – Казахстанско-Сибирская сеть (КАСИБ). Многие сортообразцы пшеницы мягкой яровой, изучаемые в КАСИБ, в дальнейшем включаются в Госреестры Российской Федерации и Республики Казахстан, внедряются в производство, а также используются в селекционных программах. Ярким примером является изучение сортообразцов «Омского АНЦ»: Лютесценс 6/04-4 испытывался в 2015 и 2016 гг., затем в 2019 г. был включен в Госреестры РФ и РК под названием Омская 42; Лютесценс 79/04-11 изучался в 2017 и 2018 гг. и был включен в Госреестр РФ в 2021 г. как сорт Омская 44, а Лютесценс 70/06-4 проходил испытание в 2019 и 2020 гг. и в 2022 г. был включен в Госреестр РФ под названием Тарская юбилейная. В экологических точках, где было отмечено поражение посевов листостебельными патогенами, эти сорта подтвердили высокую и умеренную устойчивость к стеблевой и бурой ржавчинам, а по урожайности превысили восприимчивые генотипы на 0,39-1,23 т/га. Сорта и линии, восприимчивые к грибным патогенам, по урожайности не превышали 2,0 т/га. Анализ литературных источников свидетельствует об актуальности проблемы и необходимости эффективнее вести селекционную работу по созданию сортов пшеницы мягкой яровой, устойчивых к листостебельным заболеваниям [5-7].

Цель исследований – сравнить урожайность и стабильность устойчивых и восприимчивых к листостебельным патогенам сортов яровой мягкой пшеницы в условиях

южной лесостепи Омской области за 10-летний период, 2015-2024 гг.

Материалы и методы исследования

С целью проведения сравнительного анализа с 2015 по 2024 г. были выбраны сорта: восприимчивые к бурой ржавчине (*Puccinia recondita* f. sp. *tritici*), стеблевой ржавчине (*Puccinia graminis* f. sp. *tritici*) и мучнистой росе (*Blumeria graminis* f. sp. *tritici*) – среднеранний сорт Памяти Азизова, среднеспелый Дуэт (в эти годы устойчив только к бурой ржавчине), и среднепоздний Омская 18; устойчивые к листостебельным патогенам – среднеранний Тарская юбилейная, среднеспелый Омская 44 и среднепоздний Омская 42. По качеству зерна сорта Памяти Азизова, Омская 18, Омская 44 и Омская 42 относятся к сильной пшенице, а Дуэт и Тарская юбилейная – к ценной. Сорта Памяти Азизова, Омская 18, Омская 44 и Омская 42 характеризуются повышенной засухоустойчивостью, их индекс устойчивости (*ir*) по оценке *in vitro* колебался от 0,52 до 0,60 [8]. У сортов Тарская юбилейная и Омская 42 выявлена пшенично-ржаная транслокация *IRS.1BL* (*Lr26/Sr31*). Сорт Омская 44 характеризуется двумя транслокациями – пшенично-ржаной *IRS.1BL* (*Lr26/Sr31*) и пшенично-пырейной *7DL-7Ai* (*Lr19/Sr25*). Сорт Дуэт устойчивый к бурой ржавчине (ген *Lr9*) [9]. В годы массового развития листостебельных патогенов сорта Тарская юбилейная и Омская 42 (одна транслокация) проявляли умеренную устойчивость к бурой ржавчине и высокую к стеблевой, а сорт Омская 44 (две транслокации) характеризовался высокой устойчивостью к ржавчина патогенам. К патогену мучнистой росы все сорта характеризовались средним уровнем устойчивости (ИУ = 0,36-0,65).

Посев проводили сеялкой ССФК – 7 М, площадь делянки 10 м², повторность четырехкратная. Норма высева 5,5 млн всхожих семян на гектар. Сроки посева – 12-15 мая. Для оценки устойчивости сортов к бурой, стеблевой ржавчинам и мучнистой росе использовали международную шкалу [10, с. 34-36]. Учеты проводили в динамике 3–5 раз через 5–7 суток с начала проявления заболеваний до восковой спелости. Рассчитывали площадь под кривой развития заболеваний (ПКРБ) и индекс устойчивости (ИУ): высокий – от 0,10 до 0,35; средний – от 0,36 до 0,65; низкий – от 0,66 до 0,80 и восприимчивость >80 [11, с. 45-47]. Результаты исследований статистически обработаны по Доспехову Б.А. [12], с использованием пакетов программ Microsoft Office Excel, 2010. При сравнении сортов по урожайности рассчи-

тывали базисные показатели абсолютного прироста и темпа прироста [13, с. 98–101]. Параметры экологической пластичности рассчитаны по наиболее распространённой методике Эберхарта, Рассела (S.A. Eberhart, W.A. Russell, 1996) в изложении Зыкина В.А. и др. [14, с. 29–44]. Особую ценность представляют сорта со средней и высокой урожайностью, коэффициент регрессии (b_1) близок или превосходит 1, стабильность (σ_d^2) близка к 0. Для объективной оценки сортов по урожайности были рассчитаны следующие показатели:

- средняя арифметическая (\bar{x});
- коэффициент вариации $(Cv, \%) = (\text{стандартное отклонение (s)}/\bar{x}) * 100$;
- реализация потенциала продуктивности, $\% = (\bar{x}/\text{макс.}) * 100$;
- фактор стабильности $(S.F.) = (\text{макс.}/\text{мин.})$;
- степень депрессии урожая $(D, \%) = (Y_1 - Y_2) * 100/Y_1$,

где Y_1 – максимальная урожайность в относительно благоприятный год; Y_2 – фактическая урожайность оцениваемого года [15].

Результаты исследования и их обсуждение

За 10 лет, с 2015 по 2024 г. изучения, по агрометеорологическим условиям 7 лет были благоприятными для развития листостебельных патогенов (с 2015 по 2020 г. и в 2024 г.). ГТК в эти годы в течение вегетационного периода колебался от 0,98 до 1,76. Восприимчивые сорта к ржавчинным пато-

генам Памяти Азиева и Омская 18 поражались на 80–100%. Сорт Дуэт был устойчивый к бурой ржавчине и на 100% поражался стеблевой. Поражение растений мучнистой росой колебалось от 60 до 90%. Неблагоприятные условия вегетационного периода для листостебельных заболеваний продолжались три года (2021–2023 гг.), которые по влагообеспеченности характеризовались как засушливые, развитие ржавчинных заболеваний на полях не наблюдалось (ГТК май–август = 0,55, 1,0 и 0,84 соответственно) (рис. 1).

Анализ результатов оценки устойчивости сортов в полевых условиях показал, что в годы массового развития стеблевой ржавчины у восприимчивых сортов (Памяти Азиева, Дуэт и Омская 18) ИУ колебался от 0,9 до 1. Сорта Тарская юбилейная, Омская 44 и Омская 42 в эпифитотийные годы проявляли высокий уровень устойчивости, индекс устойчивости варьировал от 0,09 до 0,35. Средняя урожайность за 10 лет изучаемых сортов составила 3,63 т/га и колебалась от 2,84 до 4,65 т/га. Однако средняя урожайность восприимчивых сортов (2,72 т/га) в годы массового развития листостебельных заболеваний была на 1,68 т/га меньше, чем у устойчивых (4,42 т/га), что согласуется с другими авторами [16].

Анализ данных динамики урожайности устойчивых сортов к листостебельным патогенам выявил четкую тенденцию увеличения их урожайности в годы массового развития этих патогенов (табл. 1).

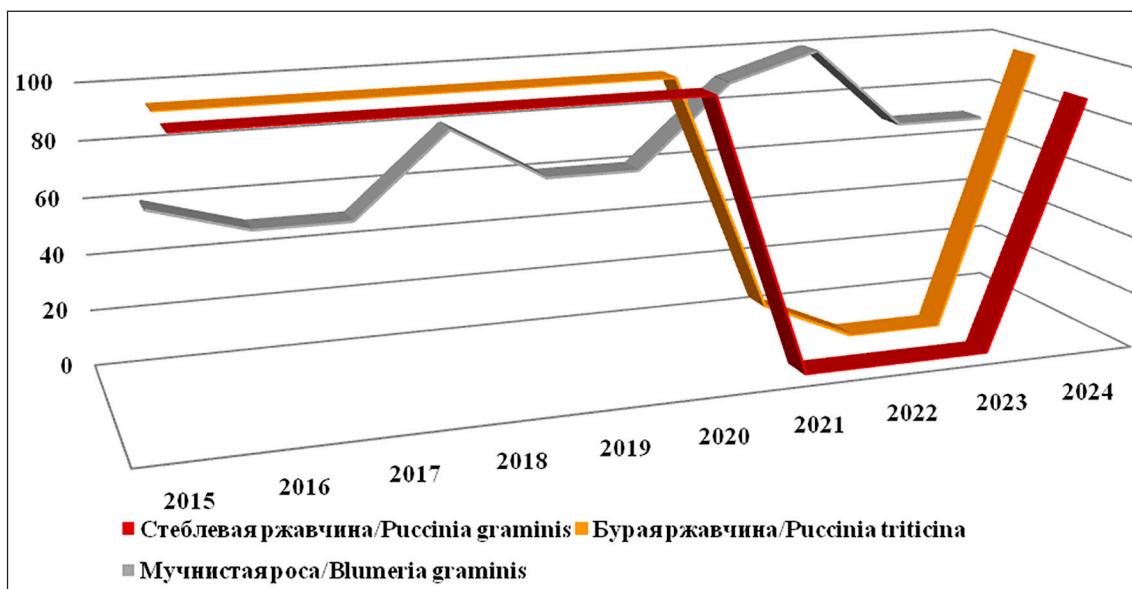


Рис. 1. Поражение листостебельными патогенами пшеницы мягкой яровой, 2015–2024 гг.

Примечание: составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследования

Таблица 1

Динамика урожайности устойчивых сортов к листостебельным патогенам
в эпифитотийные и засушливые годы

Сорт	Годы					
	эпифитотийные (2015-2020, 2024)			засушливые (2021-2023)		
	урожай- ность, т/га	абсолютный прирост, т/га	темп прироста, %	урожай- ность, т/га	абсолютный прирост, т/га	темп прироста, %
St Памяти Азиева	2,95	-	-	3,68	-	-
Тарская юбилейная	4,48	1,53	52	4,59	0,91	25
St Дуэт	2,74	-	-	3,41	-	-
Омская 44	4,35	1,61	59	3,55	0,14	4
St Омская 18	2,48	-	-	3,57	-	-
Омская 42	4,42	1,94	78	3,87	0,3	8

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

Среднеранний сорт Тарская юбилейная давал прибавку урожайности к Памяти Азиева 1,53 т/га, темп прироста был на 52% выше стандарта. Среднеспелый сорт Омская 44 также имел значительную прибавку в урожайности 1,61 т/га в сравнении со стандартом Дуэт, темп прироста составил 59%. Среднепоздний сорт Омская 42 по урожайности был на уровне сортов Тарской юбилейной и Омской 44, однако абсолютный прирост был наибольшим 1,94 т/га и темп прироста равнялся 78%. Таким образом, в эпифитотийные годы, независимо от группы спелости, устойчивые сорта показали значительное превосходство по урожайности.

В засушливые годы (2021–2023) разница по урожайности была не существенной, за исключением среднераннего сорта Тарская юбилейная, который достоверно превысил на 0,91 т/га восприимчивый стандарт Памяти Азиева.

Проведенный двухфакторный дисперсионный анализ показал, что в годы массового развития листостебельных патогенов урожайность сортов зависела от генотипа на 48,5%, а от условий изучения – на 27,9%. В годы отсутствия на посевах листостебельных заболеваний урожайность от сорта зависела на 38,6%, от года испытания на 28,9%.

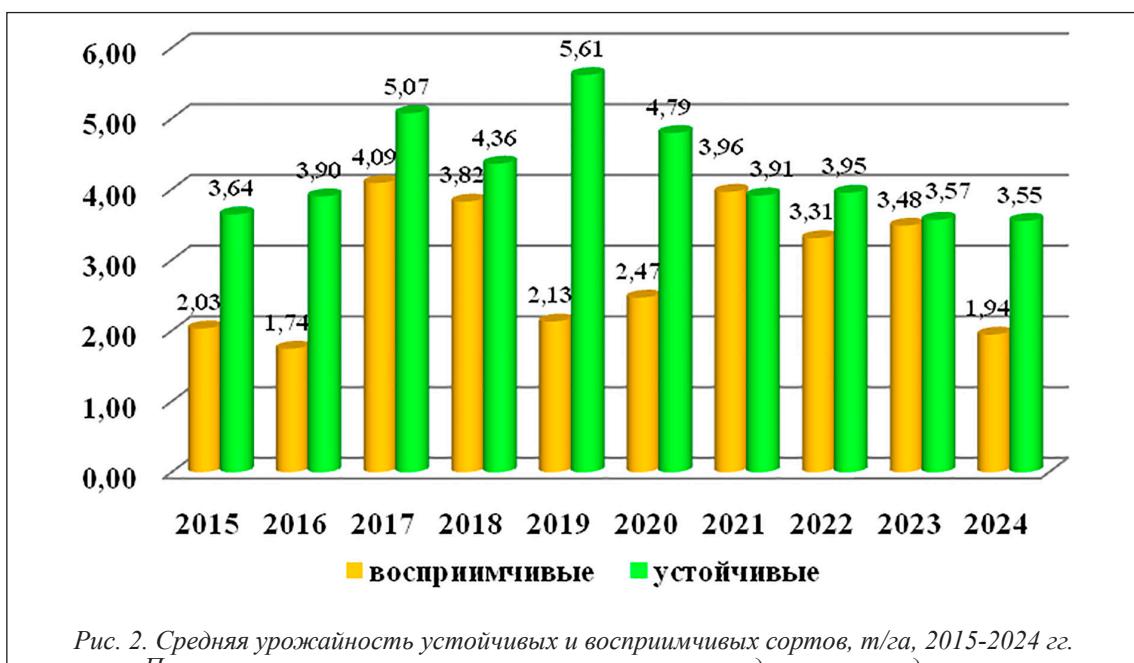


Рис. 2. Средняя урожайность устойчивых и восприимчивых сортов, т/га, 2015-2024 гг.
Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования.

В среднем ежегодная урожайность устойчивых и восприимчивых сортов представлена на рисунке 2.

На рисунке представлены данные, которые показывают, что в годы массового развития заболеваний у восприимчивых сортов урожайность не превышала 2,47 т/га, однако исключением были 2017 и 2018 годы. В эти годы в среднем урожайность восприимчивых сортов составила 4,09 и 3,82 т/га (Памяти Азиева – 3,90 т/га, Дуэт – 4,16 т/га и Омская 18 – 3,81 т/га), уступая устойчивым 0,98 и 0,54 т/га соответственно. В остальные эпифитотийные годы их средняя урожайность была существенно ниже и варьировалась от 1,61 до 2,79 т/га. Анализ учетов поражения сортов наиболее опасным и агрессивным заболеванием стеблевой ржавчиной в динамике показал, что в 2017 и 2018 гг. поражение этим патогеном у восприимчивых сортов Памяти Азиева наступало после колошения на 29-е сутки, Дуэт – 27-е сутки и Омская 18 – 23-и сутки. Период развития заболевания от начала поражения до восковой спелости в среднем за 2 года составил у Памяти Азиева 17 суток, Дуэт – 22 суток и Омская 18 – 26 суток. В годы массового развития заболевания (2015, 2016, 2019, 2020 и 2024) поражение растений этих сортов наступало значительно раньше: у сорта Памяти Азиева – на 21-е сутки (на 8 суток раньше), сорта Дуэт – на 18-е сутки (на 9 суток раньше) и Омская 18 – на 15-е сутки (на 8 суток раньше). Период развития заболевания от начала поражения до восковой спелости в среднем за 5 лет у Памяти Азиева, Дуэта и Омской 18 составил 28, 33 и 37 суток соответственно, т.е.

на 11 суток продолжительнее в сравнении с 2017 и 2018 гг.

Данными по качеству зерна установлено, что в годы массового поражения листостебельными заболеваниями, при формировании качественных показателей современные устойчивые сорта Тарская юбилейная, Омская 44 и Омская 42 имели преимущество как по натурному весу (+21,0...56,0 г/л) и массе 1000 зёрен (+6,6...14,8 г), так и по концентрации белка и клейковины в зерне, в сравнении с восприимчивыми сортами. Оптимальными технологическими свойствами отличался среднеранний ценный сорт Тарская юбилейная в целом по выборке сортов и в своей группе спелости. Выявлено, что чем позже начинается эпифитотия (2017 и 2018 гг.), тем меньшее влияние болезни оказывают на формирование качественных показателей, что согласуется с данными зарубежных авторов [17]. В эти годы в сравнении с другими годами массового развития листостебельных патогенов (2015, 2016, 2019, 2020 и 2024) у восприимчивых сортов масса 1000 зерен, натурный вес и концентрация белка в зерне были на 5,7–8,2 г, 61–78 г/л и 0,7–2,5% соответственно выше.

Периоды начала поражения растений восприимчивых сортов патогенами сопряжены с урожайностью, массой 1000 зерен, натурным весом и концентрацией белка в зерне. Расчет коэффициента корреляции между началом эпифитотий и урожайностью, а также показателями качества зерна удостоверил, что чем позднее наступает период поражения растений возбудителями, тем выше урожайность ($r=0,71\pm0,25$), масса 1000 зерен ($r=0,65\pm0,27$) и натура зерна ($r=0,64\pm0,27$).

Таблица 2

Показатели урожайности и стабильности устойчивых и восприимчивых сортов к листостебельным патогенам пшеницы мягкой яровой, 2015-2024 гг.

Сорт	X	Min	Max	Bi	B2d	Cv, %	Потенциал пролуктивности, %	Фактор стабильности	Генетическая гибкость, т/га	Депрессия, %
П. Азиева	2,95	1,90	4,49	1,15	0,21	30	66	2,4	3,2	58
Дуэт	2,8	1,61	4,43	0,42	0,19	36	63	2,8	3,0	64
Омская 18	2,94	1,66	4,46	0,93	0,81	37	66	2,7	3,1	63
Тарская юбилейная	4,52	3,23	6,09	1,3	0,3	18	74	1,9	4,7	47
Омская 44	4,11	2,91	5,69	1	0,51	23	72	2,0	4,3	49
Омская 42	4,07	2,68	5,42	1,2	0,58	26	75	2,0	4,1	51

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

Данные, представленные в таблице 2, показывают, что за годы исследований урожайность восприимчивых сортов в среднем равнялась 2,90 т/га.

Эти сорта характеризовались высокой изменчивостью $Cv > 30\%$, показатель реализации потенциала их продуктивности 63–66%, показатель фактора стабильности выше 2, средняя урожайность в контрастных условиях колеблется от 3,0 до 3,2 т/га и депрессия урожая превышает 50%. Эти показатели подтверждают, что за годы исследований эти сорта характеризуются слабой устойчивостью к стрессовым факторам среды. У сортов, проявляющих умеренную и высокую устойчивость к листостебельным патогенам, средняя урожайность равнялась 4,23 т/га, т.е. на 1,33 т/га выше, чем у восприимчивых. Варьирование урожайности у этих сортов было существенно ниже, чем у восприимчивых (Cv колебалось от 18% до 26%). Независимо от группы спелости эти сорта превосходят восприимчивые сорта по показателям стабильности: их потенциал продуктивности от 72 до 75%, фактор стабильности не выше 2, депрессия урожая меньше 51%. Генетическая гибкость у устойчивых сортов выше 4 т/га. Резистентность к ржавчинным патогенам сортов Тарская юбилейная и Омская 42 обеспечена пшенично-ржаной транслокацией *IRS.1BL* (*Lr26/Sr31*), а у сорта Омская 44 двумя транслокациями – пшенично-ржаной *IRS.1BL* (*Lr26/Sr31*) и пшенично-пырейной *7DL-7Ai* (*Lr19/Sr25*). Такие данные доказывают их возможность противостоять экологическим стрессам.

Экологическая оценка изучаемых сортов яровой мягкой пшеницы в течение 10 лет позволила объективно охарактеризовать сорта и выявить их пластичность и стабильность. Рассчитанные параметры экологической пластичности показали, что новые сорта с коэффициентом регрессии (b_i) колеблется от 1,0 до 1,3) характеризуются высокой отзывчивостью на улучшение условий и высокой буферностью (σ_d^2 колеблется 0,31–0,58) при попадании в неблагоприятные условия. Таким образом, сорта Тарская юбилейная, Омская 44 и Омская 42 относятся к сортам интенсивного типа. Среднеранний сорт Памяти Азиева относится к экологически пластичному сорту $b_i = 1,1$ и $\sigma_d^2 = 0,2$. Однако его средняя урожайность за годы исследований не превышала 3 т/га, а урожайность нового среднеподранного сорта Тарская юбилейная 4,52 т/га и показатели экологической пластичности

($b_i = 1,3$ и $\sigma_d^2 = 0,3$), что указывает на особую ценность этого сорта в сравнении с сортом Памяти Азиева.

Селекционеру при характеристике сортов очень важно знать сопряженность урожайности с показателями экологической пластичности и стабильности. Расчеты коэффициентов корреляции выявили среднюю связь ($r = 0,66$) с коэффициентом регрессии (b_i) и тесную связь между коэффициентом вариации ($r = -0,94 \pm 0,15$), потенциалом продуктивности ($r = 0,95 \pm 0,14$), фактором стабильности ($r = -0,95 \pm 0,14$), генетической гибкостью ($r = 0,97 \pm 0,11$) и депрессией сортов ($r = -0,97 \pm 0,11$). Таким образом, рассчитанные показатели объективно оценивают сорта по пластичности и стабильности, но необходимо особое внимание уделять урожайности сорта, который представляет интерес для производства и селекции.

Заключение

Средняя урожайность восприимчивых сортов Памяти Азиева, Дуэт и Омская 18 в эпифитотийные годы листостебельных заболеваний равнялась 2,72 т/га, а у устойчивых – Тарская юбилейная, Омская 44 и Омская 42 – 4,42 т/га. Таким образом, выращивание устойчивых сортов является экологически безопасным и высокоэффективным способом защиты и дает существенную прибавку урожайности (1,68 т/га).

Дисперсионным анализом показано, что в годы массового развития листостебельных патогенов урожайность сортов зависела от генотипа на 48,5%, а в годы их отсутствия на 38,6%.

Расчет коэффициента корреляции между началом эпифитотий на растениях и урожайностью, а также показателями качества зерна удостоверил, что при более позднем периоде поражения растений возбудителями выше урожайность ($r = 0,71 \pm 0,25$), масса 1000 зерен ($r = 0,65 \pm 0,27$) и натура зерна ($r = 0,64 \pm 0,27$).

По результатам комплексной оценки адаптивности и стабильности устойчивые сорта по урожайности характеризовались более низкой вариабельностью ($Cv < 30$), их реализация потенциала продуктивности $> 75\%$, фактор стабильности (S.F.) был выше 4 т/га, генетическая гибкость (ГС) меньше 2 и депрессия (Д) меньше 51%. Эти показатели подтверждают, что за годы исследований сорта Тарская юбилейная, Омская 44 и Омская 42 характеризуются повышенной устойчивостью к стрессовым факторам среды.

Сорта Тарская юбилейная, Омская 44 и Омская 42 являются одним из резервов валовых сборов, стабилизации зернового хозяйства, а также ценным генетическим материалом при селекции на устойчивость и продуктивность в условиях Западной Сибири.

Список литературы

1. Дружин А.Е., Сибикеев С.Н., Крупнов В.А. Увеличение генетического разнообразия саратовских пшениц методами интрапрессивной селекции как развитие идей Н.И. Вавилова // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н.И. Вавилова. 2012. № 10. С. 33-38. ID: 18100620.
2. Россеева Л.П., Белан И.А., Мешкова Л.В., Блохина Н.П., Ложникова Л.Ф., Осадчая Т.С., Трубачеева Н.В., Першина Л.А. Селекция на устойчивость к стеблевой ржавчине яровой мягкой пшеницы в Западной Сибири // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2017. № 7 (153). С. 5-12. ID: 29368539.
3. Рсалиев А.С., Гультьяева Е. И., Шайдаюк Е.Л., Коваленко Н.М., Молдажанова Р.А., Паҳратдинова Ж.У. Характеристика устойчивости перспективных образцов яровой мягкой пшеницы к листостебельным болезням // Биотехнология и селекция растений. 2019. № 2(2). С. 14–23. DOI: 10.30901/2658-6266-2019-2-14-23 EDN: HVFOBG.
4. Белан И.А., Россеева Л.П., Григорьев Ю.П., Блохина Н.П., Золкин Д.А., Мухина Я.В. Создание сортов яровой мягкой пшеницы, устойчивых к грибным заболеваниям, для условий Западной Сибири и Северного Казахстана // Аграрная Россия. 2020. № 6. С. 3-8. DOI: 10.30906/1999-5636-2020-6-3-8.
5. Гончаров Н.П., Косолапов В.М. Селекция растений – основа продовольственной безопасности России // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2021. № 25(4). С. 361–366. DOI: 10.18699/VJ21.039.
6. Баранова О.А., Сибикеев С.Н., Конькова Э.А. Анализ устойчивости к стеблевой ржавчине и идентификация Sr-генов у интрапрессивных линий яровой мягкой пшеницы // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2023. 184(1). С. 177-186. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-1-177-186.
7. Pershina L., Trubacheva N., Badaeva E., Belan I., Rossieva L. Study of androgenic plant families of alloplasmic introgession lines (*H. vulgare*)–*T. aestivum* and the use of sis-ter DH lines in breeding // Plants (Basel). 2020. № 9(6). 764. DOI: 10.3390/plants9060764.
8. Россеев В.М., Белан И.А., Россеева Л.П. Использование метода *in vitro* в селекции пшеницы мягкой яровой // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2016. № 2 (136). С. 5-9. EDN: VQSPJP.
9. Мухордова М.Е., Белан И.А., Россеева Л.П. Использование молекулярных маркеров в селекции пшеницы мягкой яровой в Омском аграрном научном центре // Достижения науки и техники АПК. 2022. № 36 (6). С. 5-10. DOI: 10.53859/02352451_2022_36_6_5.
10. Россеева Л.П., Мешкова Л.В., Белан И.А., Мухордова М.Е., Пахотина И.В., Николаев П.Н. Комплексная оценка генотипов зерновых культур с селекции растений: методическое пособие / ФГБНУ «Омский АНЦ». Омск, 2025. 88 с. ISBN: 978-5-98559-059-3.
11. Коваленко Е.Д., Коломиец Т.М., Киселева М.И., Жемчужина А.И., Смирнова Л.А., Щербик А.А. Методы оценки и отбора исходного материала при создании сортов пшеницы устойчивых к бурой ржавчине: методические рекомендации // Российская акад. с.-х. наук, Всероссийский науч.-исслед. ин-т фитопатологии (ВНИИФ) Москва: РС дизайн, 2012, 94 с. ISBN: 978-5-905956-01-09.
12. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта: с основами статистической обработки результатов исследований. 5-е изд., доп. и перераб. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с. END: ZJQBUD.
13. Гришин А.Ф. Статистика: учеб. пособие. М.: Финансы и статистика, 2003. 240 с. ISBN: 5-279-02594-1.
14. Зыкин В.А., Белан И.А., Юсов В.С. и др. Экологическая пластиность сельскохозяйственных растений: методика и оценка. Уфа, 2011. 96 с. ISBN: 5-7456-0137-X.
15. Барковская Т.А., Гладышева О.В., Кокорева В.Г. Сравнительный анализ нового сорта яровой мягкой пшеницы Арсес с районированными сортами // Зерновое хозяйство России. 2022. №1 (79). С. 30–34. DOI: 10.31367/2079-8725-2022-79-1-30-34.
16. Волкова Г.В., Кудинова О.А., Мирошниченко О.О. Стеблевая ржавчина – особо опасное заболевание пшеницы // Достижения науки и техники АПК. 2020. Т. 34. № 1. С. 20–25. DOI: 10.24411/0235-2451-2020-10104.
17. Simón MR, Fleitas MC, Castro AC and Schierenbeck M (2020) How Foliar Fungal Diseases Affect Nitrogen Dynamics, Milling, and End-Use Quality of Wheat. *Front. Plant Sci.* 11:569401. DOI: 10.3389/fpls.2020.569401.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

СТАТЬИ

УДК 911.2
DOI 10.17513/use.38446

РЕЗУЛЬТАТЫ ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ ТЕРРИТОРИИ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ОКРУГА

Алексеев И.А.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт географии
Сибирского отделения Российской академии наук имени В.Б. Сочавы,
Иркутск, Российской Федерации;*

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Благовещенский государственный педагогический университет», Благовещенск,
Российская Федерация, e-mail: igoralex20071@mail.ru.*

Целью работы является создание и апробация научно обоснованного варианта физико-географического районирования весьма разнородной и композитной территории Дальневосточного федерального округа. Представленная схема физико-географического районирования территории Дальневосточного федерального округа создает актуальную на настоящее время и упорядоченную систему индивидуально-типологического учета однородных типов ландшафтов. При этом помимо зональных и азональных факторов (условий) формирования ландшафтов территории учитываются и процессы экотональной динамики зональных и провинциальных типов ландшафтных комплексов. При проведении исследования применены комплексные методы физико-географического анализа и дедуктивный (метод «сверху»), индуктивный (метод «снизу») способы физико-географического районирования. Информационной основой районирования послужили материалы полевых многолетних стационарных, полустационарных и маршрутных исследований ландшафтов Сибири и Дальнего Востока Российской Федерации с применением материалов дистанционного зондирования Земли. Дифференцированы ландшафтные комплексы территории в системе таксономических единиц «физико-географическая страна – физико-географическая провинция – физико-географическая область – физико-географический район (группа физико-географических районов) – ландшафт». Результаты исследования позволили сформировать схему территориальной дифференциации ландшафтов территории, отдельные элементы которой (физико-географические районы) являются основой для дальнейших исследований структуры и динамики состояний ландшафтных комплексов, прогнозирования состояний окружающей среды и практического учета при формировании систем природопользования в пределах субъектов Дальневосточного федерального округа.

Ключевые слова: физико-географическое районирование, ландшафт, Дальневосточный федеральный округ

RESULTS OF PHYSICAL AND GEOGRAPHICAL ZONING OF THE TERRITORY OF THE FAR EASTERN FEDERAL DISTRICT

Alekseev I.A.

*Federal State Budgetary Scientific Institution Institute of Geography named after V.B. Sochava
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation;*

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
“Blagoveschensk State Pedagogical University”, Blagoveschensk, Russian Federation,
e-mail: igoralex20071@mail.ru*

The aim of this study is to develop and test a scientifically based method for zoning the highly heterogeneous and composite territory of the Far Eastern Federal District. The presented scheme for zoning the Far Eastern Federal District creates a relevant and organized system for individually typologically accounting for homogeneous landscape types. In addition to zonal and azonal factors (conditions) shaping the territory's landscapes, the ecotonal dynamics of zonal and provincial types of landscape complexes are also considered. The study utilized integrated methods of physiographic analysis and deductive (top-down) and inductive (bottom-up) methods of zoning. The zoning was based on data from long-term field studies of the landscapes of Siberia and the Russian Far East, conducted at permanent, semi-permanent, and route sites using Earth remote sensing data. Landscape complexes of the territory were differentiated within the taxonomic unit system «physical-geographical country – physical-geographical province – physical-geographical region – physical-geographical region (group of physical-geographical regions) – landscape.» The study's results allowed for the development of a framework for the territorial differentiation of the territory's landscapes, whose individual elements (physical-geographical regions) form the basis for further research into the structure and dynamics of landscape complexes, environmental forecasting, and practical consideration in the development of nature management systems within the Far Eastern Federal District.

Keywords: physical and geographical zoning, landscape, Far Eastern Federal District

Введение

ДФО расположен в крайней восточной части Российской Федерации, занимает более 40% ее площади, в восточной и северо-восточной частях материка Евразия. Значительная разнородность и разнообразие типов геолого-геоморфологического устройства территории ДФО обусловлены разнородностью и композитностью тектоно-геологических блоков и форм рельефа и, соответственно, значительным уровнем физико-географической дифференциации ландшафтов. При этом уровень инфраструктурной оснащенности и в целом хозяйственной освоенности ДФО крайне низкий в сравнении с центральными регионами страны. Между тем территория субъектов ДФО, помимо своего геополитически важного трансграничного положения в Азиатско-Тихоокеанском регионе, наличия сопредельного обширного участка Северного морского пути, обладает огромными запасами месторождений различных соединений химических элементов, что в совокупности имеет колossalное значение для развития экономики и обеспечения безопасности Российской Федерации.

Для обеспечения эффективного управления и оптимального развития такой обширной части территории страны необходимы точное знание и обязательный учет региональных и местных особенностей организации и функционирования систем окружающей среды. Такое территориально дифференцированное и структурированное информационное обеспечение может предоставить комплекс физико-географического районирования и сопутствующих описания и учета особенностей физико-географических выделов.

Стоит отметить наличие множества вариантов схем физико-географического районирования территории Российской Федерации [1; 2], которые находят свое отражение в схемах районирования субъектов ДФО [3, с. 194–195], формировании материалов и оперирования ими территориальными органами уполномоченных федеральных органов исполнительной власти, органов местной власти, организаций и учреждений [4].

Цель исследования – научно обоснованная разработка варианта физико-географического районирования территории ДФО.

Материалы и методы исследования

С учетом проблематичности достоверной дифференциации границ групп типов ландшафтов (физико-географических районов) на основе сопряженного анализа материалов полевых наблюдений и результатов десифровки результатов дистанционного

зондирования Земли установление линий разграничения (границ) осуществлялось на основе учета контрастности средовых показателей геоморфологической и ландшафтно-биоценотической структуры между двумя и более индивидуально-типовыми (синтетическими) группами типов ландшафтов без учета их экотонов, считая их монолитными и монотипными. Для формирования информационного комплекса районирования территории ДФО способом «снизу» с отображением и классификацией показателей, структуры элементарных внутриландшафтных комплексов в пределах дифференцируемых физико-географических районов на территории ДФО на основе принципа равномерного распределения в пределах основных типов и видов лесных равнинных и горных ландшафтов были выбраны и исследованы более 450 ключевых стационарных участков, в пределах которых были дифференцированы контуры выделов элементарных ландшафтов [5, с. 268–378].

Комплекс работ физико-географического районирования проводился в течение двух этапов. Первоначально районирование осуществлялось на основе применения индуктивного способа (метод «снизу») физико-географического районирования с учетом, уточнением и переработкой имеющихся материалов ранее проведенных региональных исследований [6] и схем районирования [7, с. 23]. При этом с учетом современного опыта физико-географического районирования территории РФ [8–10] были разработаны схемы индивидуально-типологического физико-географического районирования территории субъектов ДФО в системе таксонов «тип ландшафта – физико-географический район (группа физико-географических районов) – физико-географическая область – физико-географическая страна». На втором этапе с применением дедуктивного (метод «сверху») способа физико-географического районирования в системе таксономических единиц «физико-географическая страна – физико-географическая провинция – физико-географическая область – физико-географический район (группа физико-географических районов)» с преимущественным учетом границ геолого-геоморфологических комплексов проведено уточнение контуров выделов.

Для обоснования объективности пространственной дифференциации ландшафтно-биоценотической структуры на территории ДФО на уровне физико-географических стран, каждого физико-географического района в пределах каждого контура физико-географической страны были выполнены

систематизация и обобщение доминирующих типов и разновидностей почв, групп типов доминирующих растительных ассоциаций.

Результаты исследования и их обсуждение

Основные закономерности формирования генетически и структурно-морфологически неоднородной системы равнинных и орогенных ландшафтов территории ДФО определили формирование специфической по пространственному рисунку зонально-провинциальной структуры территорииально приуроченных типов ландшафтов [5, с. 80], характеризующейся типичными показателями, свойственными в целом равнинным и горным ландшафтам лесной зоны Евразии [11, с. 47; 12, с. 15; 13, с. 22].

Азональные факторы и следствия их воздействия обусловлены неравнозначностью и неодинаковостью тектонического режима, геологической структуры, морфоструктуры рельефа и прочими явлениями и процессами, имеющими преимущественно эндогенный характер генезиса [14; 15]. Азональные факторы дифференциации территории ДФО определяют наличие физико-географических областей, относящихся к более чем четырем физико-географическим странам.

Несмотря на наличие значительного количества азональных факторов дифференциации физико-географической среды, территория ДФО характеризуется наличием хорошо выраженных зональных типов ландшафтов. Хотя общие очертания контуров распространения зональных типов ландшафтов искажаются геоморфологическим устройством и пространственной компоновкой территории как участка материка Евразия, определяя смещение границ распределения типов ландшафтов в северо-восточной части, в целом они характеризуются полнотой и разнообразием.

Изучение объектов, явлений и процессов, происходящих в любых системах географической оболочки, неразрывно связано с их типологизацией, классификацией как одной из основ анализа, структуризации, дискретизации информации по конкретному принципу, признаку, допущению. Не представляется возможным выявление любых закономерностей и особенностей (специфики) местных (локальных), региональных (территориальных), зональных показателей пространственной структуры ландшафтных комплексов различного иерархического уровня. Без сомнения, все однотипные и однородные ландшафтные комплексы одного иерархического уровня, с учетом особенно-

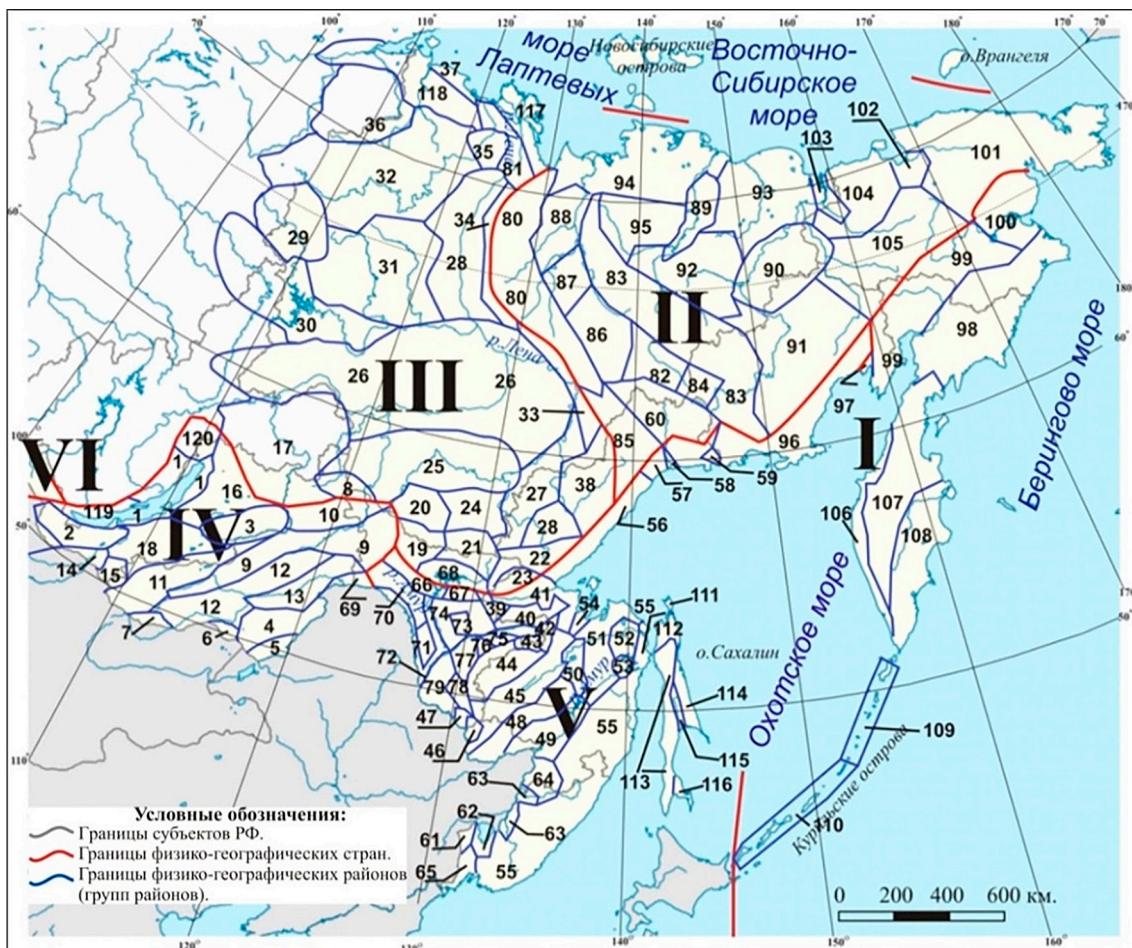
сти влияний местных, локальных условий проявляют одинаковые реакции на различные воздействия. Соответственно, дифференциация географической оболочки и последующее обобщение ее результатов в форме типологизации, классификации и в итоге районирования как процесса объединения групп ландшафтов с однотипными реакциями, проявлениями морфологии на воздействие зональных и азональных факторов может проводиться применением методов «сверху» и «снизу» районирования, взаимодополняющих и уточняющих друг друга.

Наиболее удобным для классификации и обобщения, типологизации каких-либо признаков, показателей является иерархический уровень дифференциации географической оболочки – уровень типа ландшафта и уровень групп типов ландшафтов. При этом все разнообразие ландшафтов территории ДФО на основе учета специфики происхождения, геоморфологического устройства и исходного состояния структуры было структурировано в 4 основных класса, 19 подклассов и 125 родов [5, с. 72–75]. Это позволило сформировать формализованную выборку-основу для обоснования критерии дифференциации контуров выделов физико-географических районов.

В рамках проведенного исследования показателей, структуры ландшафтов на стадиях природного, природно-антропогенного и антропогенного состояний были применены актуализированные применительно к региональной специфике территории исследования и многократно апробированные синтетические методики, сочетающие в себе параллельное применение методов анализа структуры ландшафтных комплексов как преимущественно методом «снизу» (в системах иерархии таксонов физико-географического районирования «типа ландшафта – физико-географический район (группа физико-географических районов) – физико-географическая область – физико-географическая страна» и уточняющие границы ландшафтного районирования «фация (группа фаций, растительных ассоциаций) – урочище – группа урочищ – ландшафт») с проведением стационарных многолетних исследований на ключевых участках, так и преимущественно методом «сверху» (в системе иерархии таксонов физико-географического районирования «физико-географическая страна – физико-географическая провинция – физико-географическая область – физико-географический район (группа физико-географических районов)») [5, с. 72].

На основе методических положений типологического и индивидуального геоморфологического-фитобиоценотического принципов дифференциации ландшафтов как основы для проведения дифференциации и объединения в группы, районы таксонов была разработана, впоследствии уточнена и дополнена в результате полевой изученности территории с учетом специфики ее разнородности, дифференциации синтетическая схема классификации ландшафтов с применением индивидуальных единиц ландшафтов и типологических единиц внутриландшафтных комплексов на территории ДФО [5, с. 268–378]. В разработанной при этом схеме типологизации, классификации ландшафтов в пределах генетически однородной и типологически единой физико-географической страны совмещены иерархически распределенные классы, подклассы и соответствующие им индивидуальные ландшафты с указанием доминирующего типа внутриландшафтных комплексов [5, с. 72–75].

Путем совмещения материалов обобщения информации о преобладающих классах, типах ландшафтов и их групп на основе применения методов физико-географического и ландшафтного районирования «снизу» и «сверху» были дифференцированы контуры 5 физико-географических стран, 121 обобщенного типа физико-географических районов (групп районов) (рисунок), 1500 видов ландшафтов и более 10 000 контуров элементарных ландшафтов [5, с. 95]. При этом 19 физико-географических провинций и 52 физико-географические области дифференцировались, но были генерализованы для оптимизации представления информации на картографических изображениях и для формирования упрощенного пространственного формализованного «опорного каркаса» для анализа и учета закономерностей и специфики показателей различных типов и видов территориально доминирующих ландшафтов территории.



Фрагмент карты-схемы физико-географического районирования территории северо-восточной окраины Евразии в системе таксономических единиц «физико-географическая страна – физико-географический район (группа районов)»
Примечание: составлен автором на основе источника [5, с. 91]

Цифровыми индексами на карте-схеме обозначены:

Физико-географические страны:

I – Курильско-Камчатская (Северо-Притихоокеанская); II – Верхоянско-Янско-Индигирско-Анадырская (Северо-Восточно-Сибирская); III – Среднесибирская (Среднесибирско-Алдано-Становая); IV – Прибайкальско-Забайкальская (Байкальско-Джугджурская); V – Амурско-Охотско-Приморская (Амурско-Сахалинская); VI – Алтайско-Саянская.

Физико-географические районы (группы районов):

1 – Прибайкальский горно-тундровый, горно-таежный; 2 – Хамар-Дабанский горно-таежный; 3 – Витимского плоскогорья горно-таежный; 4 – Нерчинско-Урюмканский горно-равнинный таежно-лесостепной и горно-степной; 5 – Абагатуйско-Краснокаменский степной и лесостепной; 6 – Даурско-Торейский сухостепной и полупустынный; 7 – Сохондинский лесостепной и степной; 8 – Каларский горно-таежный; 9 – Янкано-Чернышевский горно-таежный; 10 – Эльгакано-Олекминский горно-таежный; 11 – Чиконско-Малханско-Яблоновский горно-таежный; 12 – Даурско-Шилкинско-Тунгирский горно-таежный; 13 – Борщовочно-Амазарский горно-равнинно-таежно-смешанолесной; 14 – Джидинский горно-лесной; 15 – Кяхтинско-Хилокский мелкосопочко-равнинный таежно-лесостепной и степной; 16 – Икатско-Муйский горно-таежный; 17 – Станового и Патомского нагорий горно-тундрово-таежный; 18 – Тарбагатайско-Курбинский горно-таежный, горно-лесостепной; 19 – Олекминский горно-тундрово-таежный; 20 – Олекминско-Чарский горно-тундрово-таежный; 21 – Токинский горно-тундрово-таежный; 22 – Джугдырский горно-тундрово-таежный; 23 – Майский горно-тундрово-таежный; 24 – Тимптонско-Учурский горно-таежный; 25 – Приленский высокоравнинный (Приленского плато) таежный; 26 – Центральноякутский равнинный таежный; 27 – Алдано-Амгинский высокоравнинный таежный; 28 – Амгинско-Майский равнинно-мелкосопочко-таежный; 29 – Среднелененский мелкосопочко-останцово-высокоравнинный таежный; 30 – Вилюйско-Оленёкский (Вилюйского плато) горно-таежный; 31 – Верхневилюйский структурно-останцово-мелкосопочко-высокоравнинный (Верхневилюйского «плато») таежный и редколесный; 32 – Оленёкско-Анабарский структурно-низкогорно-мелкосопочко-высокоравнинный горно-таежный, таежно-редколесный, лесотундровый; 33 – Ленско-Алданский тектоно-платообразно-высокоравнинно-мелкосопочко-таежный; 34 – Ленско-Верхоянский структурно-мелкосопочко-высокоравнинный таежный, таежно-редколесный, лесотундровый; 35 – Кыстыкский (Кыстыкского плато) холмогорно-высокоравнинно-холмисто-увалистый редколесный, лесотундровый; 36 – Анабарский (Анабарского плато) структурно-низкогорно-мелкосопочко-останцовый горно-тундровый, горно-таежный, горно-редколесный, лесотундровый; 37 – Прончищевский высокоравнинный арктопустынный, аркотундровый; 38 – Юдомо-Майский горно-таежно-редколесный; 39 – Джагдинский горно-таежный; 40 – Селемджинско-Селитканский горно-таежный; 41 – Удской равнинный таежный; 42 – Ям-Алинский горно-таежный; 43 – Эзопский горно-тундровый, горно-таежный; 44 – Туренский горно-таежный; 45 – Буреинский горно-таежный, смешанолесной; 46 – Хинганский структурно-мелкосопочко-таежный, смешанолесной, широколиственный; 47 – Амурско-Архаринский низкоравнинный смешанолесной, луговой; 48 – Талакано-Воскресенско-Баджальский горно-таежный, смешанолесной, широколиственный; 49 – Среднеамурский равнинный подтаежный, смешанолесной, широколиственный; 50 – Эворон-Чукчагирский равнинный подтаежный, смешанолесной, широколиственно-мелколиственный; 51 – Тугурско-Николаевско-Омальско-Омельдинский горно-таежный, горно-смешанолесной; 52 – Нижнеамурский (Амурско-Амгуньский) равнинный подтаежный, смешанолесной, мелколиственно-широколиственный; 53 – Удиль-Кизигинский равнинный смешанолесной, лугово-болотный; 54 – Тугурский равнинный таежно-смешанолесной; 55 – Сихотэ-Алиньский (Западного и Восточного мегасклонов) горно-таежный, горно-редколесный, горно-смешанолесной, горно-широколиственный; 56 – Улья-Прибрежный горно-таежный, горно-редколесный; 57 – Уракский горно-таежный, горно-редколесный; 58 – Охотский равнинный редколесный; 59 – Кава-Тауйский равнинный редколесный; 60 – Сунтар-Хаятинский горно-таежный, горно-редколесный; 61 – Восточно-Маньчжурский горный лесостепной, горно-степной; 62 – Приханкайская равнинная лугово-степная, степная; 63 – Уссурийский равнинный подтаежный, смешанолесной; 64 – Бикинский структурно-мелкосопочко-увалистый горно-смешанолесной; 65 – Хасанский равнинный смешанолес-

ной, широколиственный; 66 – Тукуингрский гольцовый, горно-таежный; 67 – Соктаханский гольцовый, горно-таежный; 68 – Верхнезейский предгорно-равнинный таежный; 69 – Джелтулинский горно-таежный; 70 – Амурско-Зейский высокоравнинный (Амурско-Зейского «плато») с останцами таежный, подтаежный; 71 – Амурско-Зейский высокоравнинно-холмисто-увалистый подтаежный, смешаннолесной; 72 – Амурско-Зейский низкоравнинный смешаннолесной, мелколиственно-широколиственный; 73 – Мамынский (Майский) равнинный таежный; 74 – Депско-Норско-Селемджинский равнинный таежный, смешаннолесной; 75 – Селемджинско-Альдиконский равнинный таежный; 76 – Биканско-Ульминско-Томско-Алеунский (Быссинский) равнинный таежный; 77 – Зейско-Буреинский (Томский) высокоравнинный холмисто-увалистый подтаежный, смешаннолесной; 78 – Зейско-Буреинский (Завитинский) высокоравнинный пологоволнистый подтаежный, смешаннолесной; 79 – Зейско-Буреинский низкоравнинный смешаннолесной, широколиственный, лесо-луговой; 80 – Верхоянский (низкогорный, среднегорный, Западного и Восточного мегасклонов) горно-тундровый, горно-редколесный, горно-таежный; 81 – Чекановский низкогорный горно-тундровый, горно-редколесный; 82 – Оймяконский горно-тундровый, горно-редколесный; 83 – Момско-Черского горно-тундровый, горно-долинно-редколесный; 84 – Нерский горно-тундровый, горно-редколесный; 85 – Сетте-Дабанский горно-тундровый, горно-редколесный; 86 – Эльгинский горно-тундровый, горно-редколесный; 87 – Янский плоскогорный горно-тундровый, горно-долинно-редколесный; 88 – Верхоянско-Батагайский горно-тундровый, долинно-редколесный; 89 – Индигирский горно-тундровый, тундровый, редкостойный; 90 – Юка-гирский горно-тундровый, редкостойный; 91 – Колымский нагорный горно-тундровый, таежно-редколесный; 92 – Абыйский низкоравнинный тундровый, редкостойный; 93 – Колымский низкоравнинный тундровый; 94 – Яно-Индигирский низкоравнинный тундровый; 95 – Верхоянско-Уяндинский горно-тундровый, горно-редкостойный; 96 – Караменско-Ненкатский горно-равнинный горно-тундровый, стланиковый, горно-редкостойный; 97 – Гижигинский равнинный редкостойный; 98 – Корякский горно-тундровый, редкостойный; 99 – Пенжинско-Майнский горно-равнинный горно-тундровый, лесотундровый, редкостойный; 100 – Ана-дырский равнинный тундровый; 101 – Чукотский нагорный арктопустынный, тундровый; 102 – Чаунский низкоравнинный арктопустынный, тундровый; 103 – Анюйский низкоравнинный арктопустынный, тундровый; 104 – Анюйский горный горно-тундровый; 105 – Анадырский плоскогорный горно-тундровый; 106 – Западно-Камчатский прибрежно-структурно-тектонически-высокоравнинный тундровый, редкостойный; 107 – Срединно-Камчатский горный горно-пустынный, горно-тундровый, горно-таежный; 108 – Восточно-Камчатский горный горно-пустынный, горно-тундровый, горно-таежный; 109 – Северо-Курильско-островной горно-долинный горно-лесотундровый, горно-редколесно-таежный; 110 – Южно-Курильско-островной горно-долинный горно-редколесный, смешаннолесной, мелколиственно-широколиственный; 111 – Северо-Сахалинский (Шмидта) низкогорный горно-таежный, смешаннолесной; 112 – Северо-Сахалинский равнинный таежный, смешаннолесной, мелколиственный; 113 – Западно-Сахалинский горный горно-таежный, горно-подтаежный, горно-смешаннолесной, мелколиственно-широколиственный, луговой; 114 – Восточно-Сахалинский горный горно-таежный, горно-подтаежный, горно-смешаннолесной, мелколиственно-широколиственный, луговой; 115 – Поронайский равнинный подтаежный, смешаннолесной, мелколиственный, болотно-луговой; 116 – Корсаковско-Тонино-Анивский смешаннолесной, мелколиственно-широколиственный, луговой; 117 – Нижне-Ленский равнинный арктоундровый, тундрово-редкостойный; 118 – Нижне-Анабарский (Северо-Сибирской низменности) арктопустынный, арктоундрово-болотный; 119 – Байкальский (Южно-Байкальский) горно-таежный и таежный; 120 – Северо-Байкальского нагорья гольцово-горно-тундровый, криволесный, горно-таежный.

Заключение

Система применения физико-географического районирования территории как метода и как результата, формы отображения материалов физико-географических исследований позволяет в сжатом и обобщенном виде отображать совокупность значительного количества показателей ландшафтов, условий окружающей среды и облегчает оперирование ими при проведении исследований или осуществлении различных видов профессиональной деятельности специалистов в различных отраслях науки и хозяйства.

Представленный вариант физико-географического районирования территории российской части северо-востока Евразии, хотя и основан на материалах изученности актуального состояния ландшафтных комплексов на детальном уровне, не является окончательным и при дальнейшем проведении полевых и камеральных работ по изучению ландшафтных комплексов будет уточняться и корректироваться с учетом усовершенствования методического аппарата физической географии и методических подходов к изучению ландшафтов.

Учет сочетаний и варьирования зональных и азональных факторов дифференциации надландшафтных, ландшафтных и внутриландшафтных комплексов на территории субъектов ДФО позволяет при планировании и прогнозировании хозяйственной деятельности предусматривать влияние на техногенные комплексы специфичного мозаичного рисунка ландшафтов территории, который с учетом муссонного характера распределения тепла и влаги приобретает хорошо выраженные черты индивидуальности, обусловленные преимущественно геологической историей развития и тектонического и геологического строения территории.

Материалы физико-географического районирования территории ДФО могут служить информационной основой для работ на территории ДФО исследователей, специалистов различных территориальных органов исполнительной власти, муниципальных образований, образовательных учреждений.

Список литературы

1. Национальный атлас России / отв. ред. Г.Ф. Кравченко, редкол. А.В. Бородко (пред.) и др. ПКО «Картография» под общ. рук. М-ва транспорта Российской Федерации и Роскартографии. Калининград: ОАО «Янтарный сказ», 2007.
2. Природа и экология. 496 с.: карты. [Электронный ресурс]. URL: <https://nationalatlas.ru/tom2/398-399.html> (дата обращения: 28.10.2025). ISBN 5-85120-250-5.
3. Лысенко А.В., Водопьянова Д.С. Физическая география России: учеб. пособие. Ч. 2: курс лекций. Ставрополь: СКФУ, 2022. 170 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://e-lanbook.com/book/386714> (дата обращения: 30.10.2025).
4. Трофимов Н.В., Сочнева С.В., Панасюк М.В. Методика разделения территории Республики Татарстан на агроландшафтные районы на основе зонирования природно-климатических ее условий // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2019. № 4 (55). С. 127–131. URL: <https://www.vestnik-kazgau.ru/images/archive/2019/4/024%20trofimov.pdf> (дата обращения: 28.10.2025). DOI: 10.12737/2073-0462-2020-127-131.
5. Алексеев И.А. Региональная специфика автостановления структуры антропогенно нарушенных лесных ландшафтов северо-восточной окраины Евразии: дис. ... докт. геогр. наук. Циолковский, 2024. 603 с. URL: <https://igsbras.ru/uploads/theses/August2024//FyEmgeQ1jGLczou-WTQZ0S3o3XpxNBIYQhjUBsxur.pdf> (дата обращения: 28.10.2025).
6. Физико-географическое районирование: Карта / Ватлина Т.В., Котова Т.В., Малхазова С.М., Миронова В.А., Орлов Д.С., Пестина П.В., Румянцев В.Ю., Рябова Н.В., Солдатов М.С., Шартова Н.В. Масштаб 1:30000000. М.: МГУ, 2017. [Электронный ресурс]. URL: <https://geoportal.rgo.ru/iipview/6173> (дата обращения: 30.10.2025).
7. Рянский Ф.Н. Эколого-экономическое районирование в регионе. Владивосток: Дальнаука, 1993. 153 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://egfak.narod.ru/ransk.htm> (дата обращения: 28.10.2025).
8. Ноговицына М.А. Физико-географическое районирование Южного Прибайкалья // Успехи современного естествознания. 2018. № 11–2. С. 372–376. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=36955> (дата обращения: 28.10.2025). DOI: 10.17513/use.36955.
9. Блануца В.И. Районирование территории России по особенностям достижения национальных целей развития // Вестник ЗАГУ. 2022. Т. 28. № 10. С. 53–63. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/raionirovaniye-territoriy-rossii-po-osobennostyam-dostizheniya-natsionalnyh-tseley-razvitiya> (дата обращения: 28.10.2025). DOI: 10.21209/2227-9245-2022-28-10-53-63.
10. Скворцова В.А., Старокожева В.П. Обзорное исследование методик районирования территории России // Экономика, предпринимательство и право. 2024. № 11. С. 6739–6756. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzornoe-issledovanie-metodik-rayonirovaniya-territoriy-rossii> (дата обращения: 28.10.2025). DOI: 10.18334/epp.14.11.122147.
11. Алексеев И.А. Физико-географическое районирование территории Амурской области: научное издание. Благовещенск: Изд-во ДальГАУ, 2022. 103 с.: 11 карт. [Электронный ресурс]. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_48214346_48731973.pdf (дата обращения: 30.10.2025). ISBN 9785-9642-0515-9.
12. Себин В.И. Физико-географическое районирование и ландшафты Амурской области: учеб. пособие. Благовещенск: Изд-во БГПУ, 2004. 64 с.
13. Ивашинников Ю.К. Физическая география Восточной Азии: учеб. пос. для вузов. Владивосток: Изд-во ДВГУ, 2002. 568 с. ISBN 5-7444-1269-7.
14. Климанова О.А., Колбовский Е.Ю. Физико-географическое районирование как метод делимитации границ полупустынь (на примере полуостровов Ямал и Гыданский) // Проблемы региональной экологии. 2018. № 4. С. 84–88. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/fiziko-geograficheskoe-rayonirovaniye-kak-metod-delimitatsii-granits-poluostrovov-pa-primerre-poluostrovov-yamal-i-gydanskij> (дата обращения: 28.10.2025). DOI: 10.24411/1728-323X-2018-14082.
15. Петрищева Н.В., Петрищев В.П. Физико-географическое районирование ландшафтов красноцветных отложений в Оренбургском Приуралье // Вестник ВГУ. Серия: География. Геоэкология. 2023. № 2. С. 12–20. URL: <https://journals.vsu.ru/geo/article/view/11296/11403> (дата обращения: 28.10.2025). DOI: 10.17308/geo/1609-0683/2023/2/12-20.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование: Исследование выполнено за счет средств государственного задания код темы FWEM-2026-0003.

Financing: The study was carried out using funds from the state assignment topic code FWEM-2026-0003.

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВЕРХОВЫХ БОЛОТ ЛЕСОСТЕПНОЙ ЗОНЫ (НА ПРИМЕРЕ БОЛОТА НИКОЛЬСКОЕ ПЕНЗЕНСКОЙ ОБЛАСТИ)

Артемова С.Н., Сидоров Н.В.

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Пензенский государственный университет», Пенза, Российской Федерации,
e-mail: art-serafima@yandex.ru*

Цель исследования – провести геоэкологический анализ и на региональном уровне оценить экологическое состояние верховых болот на примере болота Никольское Пензенской области. Применялся комплексный подход к оценке, который включал в себя анализ ландшафтной структуры, истории хозяйственного освоения и современного использования земель, а также данных полевых ландшафтных исследований. Источной информацией явилась ландшафтная карта Пензенской области, исторические карты, начиная с карт первого Генерального межевания в России конца XIX века, а также космоснимки. В ходе работ выполнена электронная карта в программе QGIS и Google Earth Pro, где отражена ландшафтная структура и использование земель, проведен анализ исторических карт, заложены почвенные разрезы, проведены геоботанические описания и инструментальные измерения уровня и химического состава грунтовых вод, проведены микробиологические исследования почв. Полученные данные указывают на замедленный процесс торфообразования и признаки усыхания болота. Понижение уровня грунтовых вод, усиление делювиальных процессов, возможно, связано с хозяйственной деятельностью в смежных геосистемах. Болото Никольское не играет существенной роли в углеродном балансе атмосферы, однако имеет высокое природоохранное значение как рефугиум биоразнообразия и стабилизатор экосистем междуруечья Сура – Труев.

Ключевые слова: геоэкологический анализ, оценка экологического состояния, верховые болота, ландшафтная карта, Пензенская область, междуруечье Сура – Труев, болото Никольское

GEOECOLOGICAL ANALYSIS AND ASSESSMENT OF THE ECOLOGICAL STATE OF THE UPPER MARSHES OF THE FOREST-STEPPE ZONE (ON THE EXAMPLE OF THE NIKOLSKOYE SWAMP OF THE PENZA REGION)

Artemova S.N., Sidorov N.V.

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Penza State University”,
Penza, Russian Federation, e-mail: art-serafima@yandex.ru*

The purpose of the study was to conduct a geo-ecological analysis and assess the ecological state of the Verkhnyaya bog on the example of the Nikolskoye bog in the Penza region at the regional level. A comprehensive approach to assessment was applied, which included an analysis of the landscape structure, the history of economic development and current land use, as well as data from field landscape studies. The initial information included a landscape map of the Penza region, historical maps dating back to the first General Land Survey in Russia in the late 19th century, and satellite images. During the work, an electronic map was created in the QGIS and Google Earth Pro programs, which reflects the landscape structure and land use. Historical maps were analyzed, soil profiles were established, geobotanical descriptions and instrumental measurements of groundwater level and chemical composition were conducted, and microbiological studies of soils were performed. The obtained data indicate a slowdown in peat formation and signs of marsh drying. The decrease in groundwater level and the intensification of deluvial processes may be related to economic activities in adjacent geosystems. The Nikolskoye swamp does not play a significant role in the carbon balance of the atmosphere, but it is of high conservation value as a biodiversity refuge and a stabilizer of the ecosystems in the Sura-Truyev interfluvium region.

Keywords. Geo-ecological analysis, assessment of the ecological state, raised bogs, landscape map, Penza region, Sura-Truyev interfluvium, Nikolskoye bog

Введение

В настоящее время на фоне глобально-го изменения климата и регулирования по-ступления в атмосферу парниковых газов антропогенного происхождения особенно важно сохранение болот как аккумуляторов углерода атмосферы. Чистые выбросы парниковых газов в атмосферу из болот зависят от растительности, землепользования, уров-ня грунтовых вод, температуры почвы и др.

Ненарушенные болотные экосистемы являются поглотителями (стоком) углерода атмосферы. В пределах лесостепи болота имеют особое значение как место обитания для растений и животных, являются хранителями генофонда и биоразнообразия региона. Кроме того, торфяные залежи являются хранителями палеографической информации о растительности древних эпох. Верховые сфагновые болота в пределах Пензенской

области находятся на южной границе своего распространения, поэтому включают редкие и исчезающие виды растений и являются уникальными по своей структуре и функционированию, что требует специального подхода к их изучению и охране. Верховые болота лесостепи являются реликтовыми геосистемами, которые образовались в условиях гумидного климата в конце атлантического периода голоцена – 6575 ± 100 лет назад [1]. Эволюция этих уникальных геосистем происходила длительное время в условиях меняющегося климата и хозяйственной деятельности человека, что необходимо учитывать при оценке их роли в углеродном балансе атмосферы, экологическом состоянии и географическом прогнозе.

Современные исследования в области углеродного баланса атмосферы проводятся в рамках государственной задачи по реализации Парижского соглашения по глобальному изменению климата. Создан консорциум «РИТМ углерода» (Российские инновационные технологии мониторинга углерода) – всероссийский проект, направленный на исследование проблемы глобального потепления климата и роли природных и природно-антропогенных экосистем в эмиссии парниковых газов в атмосферу [2]. В настоящее время накоплен большой фактический материал об особенностях биологического круговорота углерода на региональном уровне, в том числе и для болотных экосистем [3]. В основном дается оценка болотных экосистем южнотаежной подзоны Западной Сибири. Сделан вывод, что в настоящее время они являются постоянным стоком углерода и способствуют смягчению последствий изменения климата [4]. Региональные исследования болот Западной Сибири посвящены вопросам аккумуляции минерального вещества верховыми болотами, поглощающей способности болот, а также экологическому состоянию торфяных залежей [5-7]. Региональные исследования болот лесостепной зоны Западной Сибири посвящены их генезису и геоэкологической оценке [8-10].

Изучению водораздельных болот Приволжской возвышенности посвящено немного работ. Так, например, палеоботанические исследования болотных экосистем центральной части Приволжской возвышенности отражены в работах И.В. Благовещенского [11] и Н.В. Благовещенской [12], болота Мордовии описаны в работе О.Г. Гришуткина [13]. Растительность болот Ульяновской области описана в работе И.В. Благовещенского [14].

Исследования верховых болот в пределах Пензенской области незначительны. В основном это работы, связанные с описанием растительности [15-17]. Болота лесостепи занимают небольшую площадь и существенной роли в балансе углерода не играют, но изменение климата и хозяйственная деятельность влияют на их экологическое состояние. Необходимы комплексные геоэкологические исследования, направленные на сохранение природоохранных функций болотных экосистем. В пределах Пензенской области, расположенной в зоне интенсивного хозяйственного освоения лесостепи, особенно важно обосновать необходимость включения всех верховых болот в экологический каркас.

Цель исследования – провести геоэкологический анализ и на региональном уровне (междуречье Суры-Труев) оценить экологическое состояние верховых болот (на примере болота Никольское). В задачи исследования входит: 1 – анализ морфологической структуры ландшафта с болотными геосистемами, 2 – изучение истории хозяйственного освоения исследуемой территории и современной антропогенной нагрузки, 3 – оценка экологического состояния геосистем болота Никольское и смежных геосистем.

Материалы и методы исследования

Геоэкологический анализ проводился согласно общим принципам геоэкологии и включал этапы анализа ландшафтной структуры, истории хозяйственного освоения и современного использования земель исследуемой территории [18]. Одним из основных методов является ландшафтное картографирование с использованием современных ГИС-технологий. Электронные карты выполнены в программе QGIS и Google Earth Pro. Исходной информацией о природном устройстве явилась ландшафтная карта Пензенской области [19]. В качестве исходной информации о происхождении и истории хозяйственного использования болот и смежных геосистем использовались описания и исторические карты, начиная с карт первого Генерального межевания в России конца XIX века, а также исторические космические снимки на данную территорию начиная с 1985 года [20]. Полевые ландшафтные исследования проводились летом 2023 г. и летом 2025 г. Всего было заложено 5 почвенных разрезов: 1 – на плакоре в поле, 1 – на останцовом массиве в лесу, 1 – на склоне суффозионной котловины, 1 – на окраине болота

в зоне с древесно-кустарниковой растительностью, 1 – в центральной части болота. Отбор почвенных образцов проводился с глубины 15 см. Первичный анализ физико-химических свойств проводили по классической методике почвоведения, Ph определяли с использованием лакмусовой бумаги. Биологические и микробиологические свойства почв определялись по упрощенной методике в рамках проекта гражданской науки «Всероссийский Атлас почвенных микроорганизмов» в 2023 г. (общее количество органических веществ и наличие азотфикссирующих бактерий, характеризующих плодородие почвы). Инструментальные измерения уровня грунтовых вод проводились с использованием гидрологических линеек в центральной и окраинной части болота в 2023 и 2025 гг. Описание растительности проводилось в 5 ключевых точках.

Результаты исследования и их обсуждение

Болото Никольское, расположенное в 4 километрах к северо-востоку от села Никольское Кузнецкого района Пензенской области, относится к памятникам природы регионального значения с 1999 года. Болото сформировалось на останцово-водораздельной поверхности Сурско-Кададинского ландшафта с высотами около 300 м в супфазионной котловине и представляет собой два чащебразных углубления, соединенных между собой [19]. В растительности болота много видов, занесенных в Красную книгу Пензенской области [16; 15]. Болото Никольское – это реликт среднего голоцена [1]. Верховыми такие болота называются согласно геоморфологическим признакам. Однако к олиготрофным их отнести нельзя, т. к. в условиях современного климата сформировались благоприятные условия для поступления питательных веществ в болото. Благовещенский И.В. относит их к мезоолиготрофному типу. Их развитие зависит от минерализации питающих вод и интенсивности обводнения депрессии [11]. Основное поступление воды в болото – атмосферные осадки, количество которых значительно снизилось по сравнению с климатом позднеатлантического периода. Минерализация грунтовых вод местного водоупора в ложе болота зависит от литологического состава пород, представленного лессовидными суглинками. Кроме того, в котловину поступают воды делювиального стока, характеризующегося сезонностью, но обладающие довольно высокой минерализацией вод (по современным

наблюдениям, от 130 до 210 мг/л) [11]. Это обеспечивает сохранение эвтрофного характера растительности в течение всего периода существования болота и определяет невысокую скорость вертикального прироста торфяных отложений.

На процесс эволюции озер и болот, кроме природных процессов, большое влияние оказывает хозяйственная деятельность человека. На примере Никольского болота видно, как антропогенные преобразования прилегающих территорий (распашка, выведение леса, выпас) изменяют скорость и направление естественных процессов (осушение, зарастание), что имеет практическое значение для региона. Процесс хозяйственного освоения авторы проследили по имеющимся картографическим источникам, начиная с плана генерального межевания Кузнецкого уезда Саратовской губернии 1778–1797 гг. (рис. 1).

Как видно, процесс хозяйственного освоения протекал с увеличением антропогенной нагрузки, наибольшие изменения произошли в 1970–1980-х годах, когда исследуемая территория была максимально распахана.

Геоэкологический анализ и оценка экологического состояния современных геосистем водораздела рек Сура – Труев основывался на ландшафтном картографировании, наложении данных об использовании земель и полевых исследованиях. В результате исследований получена электронная карта на исследуемый район междуречья Сура – Труев. Карта выполнена с использованием синтетического метода, который основан на дешифрировании космоснимков, а также использовалась подложка из векторного слоя горизонталей в ГИС (QGis).

Морфологическая структура ландшафта Сура – Труев складывалась в условиях эрозионно-денудационных процессов в течение неоген-четвертичного периода. Коренные породы палеогена, представленные слитыми песчаниками, опоками и опоковидными песчаниками, перекрыты покровными лессовидными суглинками на плакорах и делювиальными суглинками на склонах. Поверхность выравнивания на водоразделе Сура – Труев расположена на высоте 280–290 м, а палеогеновые останцы плотных песчаников выступают на высоту более 300 м (до 321 м). На выполненной электронной крупномасштабной ландшафтной карте отражена типологическая классификация геосистем ранга «урочище» (рис. 2). Всего выделено восемь типов уроцищ, отраженных в легенде по лигенской основе.

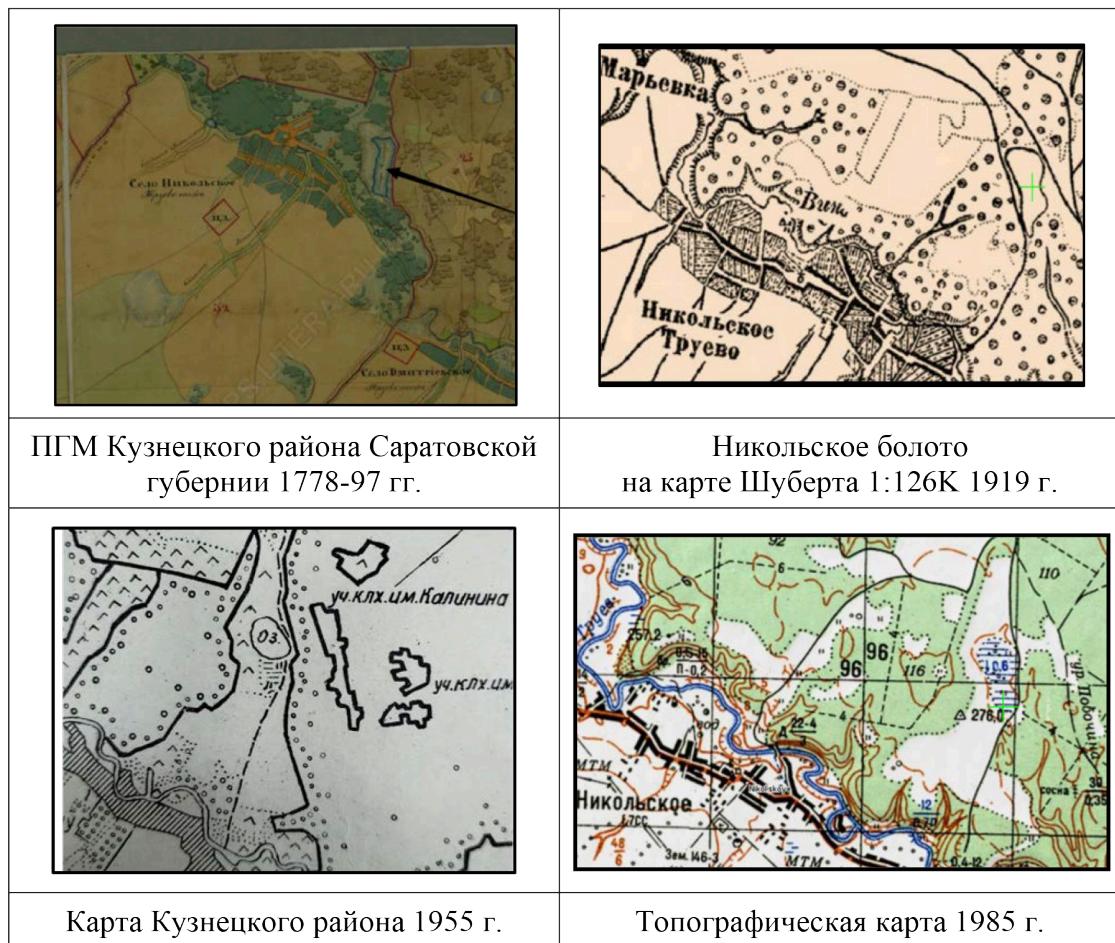


Рис. 1. История хозяйственного освоения и эволюции озера Никольское на картах [20]



Рис. 2. Электронная ландшафтная карта междуречья Сура – Труев
Источник: составлено авторами по результатам данного исследования

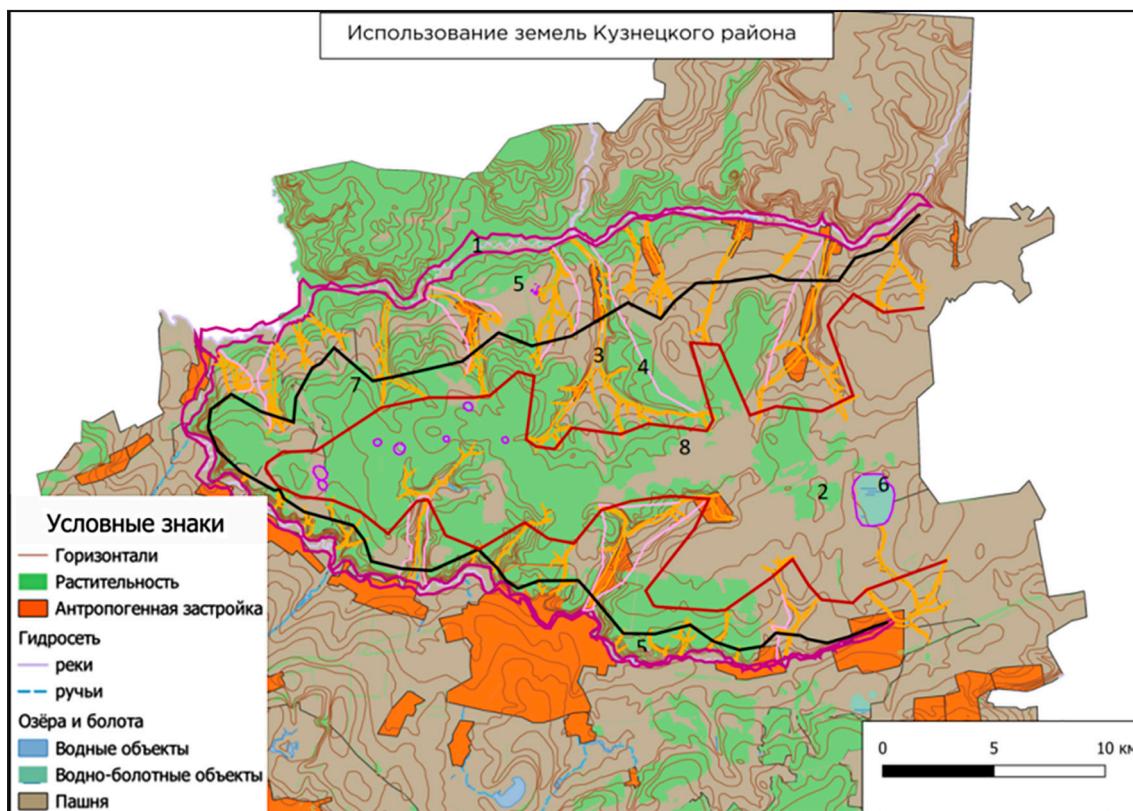


Рис. 3. Карта использования земель междуречья Сура – Труев в пределах Кузнецкого района

Источник: составлено авторами по результатам данного исследования

(цветом показаны виды использования земель, линиями и цифрами – виды урочищ)

Анализ морфологической структуры ландшафта исследуемой территории позволил сделать вывод о том, что ландшафт обладает высоким экологическим потенциалом и играет большую природоохранную роль. Ресурсный потенциал к использованию в сельском хозяйстве в этом районе небольшой. Для распашки пригодны небольшие участки плакоров, перекрытые четвертичными лессовидными суглинками с серыми лесными почвами. Карта «Использование земель», выполненная в программе QGIS с использованием векторных слоев в Google Earth Pro, позволяет выявить закономерности размещения природно-хозяйственных систем с разной степенью антропогенной нагрузки (рис. 3).

Наложение векторных слоев карты использования земель на ландшафтную карту позволяет выявить геоэкологические районы с разной степенью экологического благополучия. Все болота, расположенные в суффозионных котловинах, не испытывают существенного антропогенного воздействия, т. к. смежные геосистемы в основном лесные. Однако болото Никольское ранее

испытывало существенное антропогенное воздействие. Водосборная площадь болота (суффозионная котловина) была распахана, в настоящее время ближайшее поле имеет гидравлическую связь с делювиальными водами, питающими болото. Это приводит к общему снижению уровня грунтовых вод и усыханию болота.

Экологическое состояние болота Никольское оценивалось с учетом полевых ландшафтных исследований летних сезонов 2023 и 2025 годов. Были заложены ключевые точки на плакоре, занятом пашней, на останцовом массиве, занятом лесом, на склоне котловины и в растительных зонах болота. Суффозионная котловина имеет глубину более 20 м с пологими склонами на севере и более крутыми на востоке. Выделены две растительные зоны по ведущему типу растительности, почв и глубине залегания грунтовых вод. Первая зона – центральная часть болота, занята травянистой растительностью и сфагновым мхом с куртинами угнетенной сосны, имеет размеры 300 на 350 м, закочкарена. Высота кочек достигает 70 см при диаметре в 150 см. Глубина грунтовых

вод в 2023 г. – 45 см, в 2025 г. – 15 см. В мочажинах при надавливании появляется вода. Вторая зона – на периферии болота, имеет ширину около 50 м и состоит преимущественно из редких зарослей ивы и березы высотой 2-3 м, в травянистом покрове преобладает осока, размер кочек значительно меньше и составляет около 50 см высоты

и 70 см в диаметре. Здесь в мочажинах вода при продавливании не выступает. Почвенный разрез в этой зоне глубиной 70 см представлен почвенными горизонтами: 1 – дерново-торфяной, 10 см; 2 – глеевый горизонт сизо-серого цвета, 20 см; 3 – лёссовидные суглинки. На глубине 30 см из стенок почвенного разреза сочится вода (рис. 4).



Рис. 4. Полевые исследования болота Никольское в мае 2025 г. (фото автора)

Экологические свойства почв в суффозионной котловине

Ключевая точка, геотоп	Глубина залегания грунтовых вод (см)	Гигротоп	Мощность органогенного горизонта (см)	Мощность глеевого горизонта	Трофотоп	Ph	Микробиологические свойства (наличие азотфикссирующих бактерий)
Болото, центральная часть	15	гигро-фитный	Нет данных	Нет данных	олиготрофный	5	нет
Болото, периферия	45	мезогигро-фитный	15	13	мезотрофный	5	нет
Склон суффозионной котловины	150	мезофит-ный	25	нет	евтроф-ный	6	 есть колонии азотфикссирующих бактерий

На склоне котловины почвы типичные луговые. Первичные исследования физико-химических и микробиологических свойств почв в суффозионной котловине использовались для оценки экологического состояния болота. Наиболее важные показатели, характеризующие скорость торфоакопления и усыхания болота, отражены в таблице.

Почвенный разрез на поле показал морфологическое строение типичных серых лесных почв, на глубине 54 см – лёссовидные суглинки, устойчивый водоносный горизонт залегает предположительно на глубине 20-30 м. Мощность светло-серых почв на останцовом массиве в лесу составляет всего 15 см, подстилающими породами является элювий песчаных пород. На склоне суффозионной воронки показатели экологических свойств почвы характерны для экосистемы влажного луга. Наличие питательных веществ в почве обусловлено делювиальными процессами. На периферии болота почвы торфяно-глеевые, с сезонным процессом торфообразования с преобладанием мезотрофов.

Заключение

Данные полевых исследований, проведенные в период после половодья, подтверждают, что процесс торфообразования в болоте замедленный, на периферии имеет сезонный характер. Большую роль в водном балансе и биологическом круговороте играют делювиальные воды. Мезофильный характер растительности на периферии болота и строение почвенного разреза показывает, что происходит усыхание болота.

Таким образом, интегрированный подход к исследованию ландшафтов с верховыми болотами позволяет получить полную картину о состоянии данных экосистем и сделать следующие выводы. Во-первых, реликтовые болота лесостепи занимают небольшую площадь и не играют существенной роли в стоке атмосферного углерода. Во-вторых, усыхание болот происходит в результате увеличения испарения в условиях потепления климата, а также в результате поступления воды не только с осадками, но и с делювиальными водами повышенной минерализации, что обуславливает эвтрофный характер растительности и замедленное торфообразование. В-третьих, на экологическое состояние болот, не подверженных прямому антропогенному воздействию (торфоразработки, пожары), оказывает влияние история хозяйствен-

го освоения смежных геосистем. В-четвертых, необходимо сохранять природоохраный режим не только болота, но и всего ландшафта, в данном случае междуречья Сура – Труев.

Список литературы

1. Новенко Е.Ю., Зюганова И.С., Дюжова К.В., Волкова Е.М. Динамика растительности на южной границе зоны широколиственных лесов Восточно-Европейской равнины в среднем и позднем голоцене // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2017. Вып. 5. С. 82–94. URL: <https://www.libnauka.ru/item.php> (дата обращения 21.09.2025). DOI: 10.7868/S0373244417050073.
2. Иванов А.Л., Савин И.Ю., Столбовой В.С., Духанин Ю.А., Козлов Д.Н. Методологические подходы формирования единой национальной системы мониторинга и учета баланса углерода и выбросов парниковых газов на землях сельскохозяйственного фонда Российской Федерации // Бюллетень Почвенного института им. В. В. Докучаева. 2021. № 108. С. 175–218. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodologicheskie-podkhody-formirovaniya-edinoy-natsionalnoy-sistemy-monitoringa-i-ucheta-balansa-ugleroda-i-vybrosov-parnikovuyh> (дата обращения: 21.09.2025). DOI: 10.19047/0136-1694-2021-108-175-218.
3. Дюкарев Е.А., Семенов С.П. Численное моделирование биогеохимических циклов углерода в болотных экосистемах // Известия АлтГУ. 2022. № 4 (126). С. 104–109. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/chislennoe-modelirovaniye-biogeohimicheskikh-tsiklov-ugleroda-v-bolotnyh-ekosistemah> (дата обращения: 21.09.2025). DOI: 10.14258/izvasu(2022)4-16.
4. Головацкая Е.А., Дюкарев Е.А., Веретенникова Е.Э., Никонова Л.Г., Смирнов С.В. Оценка динамики баланса углерода в болотах южнотаежной подзоны Западной Сибири (Томская область) // Почвы и окружающая среда. 2022. № 4. С. 1–18. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-dinamiki-balansa-ugleroda-v-bolotah-yuzhnootazhnoy-podzony-zapadnoy-sibiri-tomskaya-obl> (дата обращения: 15.09.2025). DOI: 10.31251/pos.v5i4.194.
5. Сайб Е.А. Запасы надземной биомассы в болотных экосистемах лесостепной зоны Западной Сибири // Интерэко Гео-Сибирь. 2016. № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/zapasy-nadzemnoy-biomassy-v-bolotnyh-ekosistemah-lesostepnoy-zony-zapadnoy-sibiri> (дата обращения: 16.09.2025).
6. Андреева А.С., Колокольцев А.М., Трухляев Э.А. Влияние изменения климата на поглощающую способность болот на примере Ямало-Ненецкого автономного округа // Проблемы анализа риска. 2022. Т. 19. № 4. С. 46–60. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-izmeneniya-klimata-na-pogloschayushchuyu-sposobnost-bolot-na-primegere-yamalo-nenetskogo-avtonomnogo-okruga> (дата обращения: 13.09.2025). DOI: 10.32686/1812-5220-2022-19-4-46-60.
7. Зубов И.Н., Орлов А.С., Селянина С.Б. О применении окислительно-восстановительного потенциала для оценки состояния торфяных залежей болотных экосистем // Успехи современного естествознания. 2019. № 3–1. С. 51–55. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=37070> (дата обращения: 14.09.2025). DOI: 10.17513/use.37070.
8. Леонова Г.А., Мальцев А.Е., Прейс Ю.И., Бобров В.А. Геоэкологическая оценка современного состояния верховых болот (реки) Барабинской лесостепи в условиях антропогенного воздействия // Геосферные исследования. 2022. № 4. С. 76–95. URL: <https://cat.gpntb.ru/?id=EC>ShowFull&irbDb=ESVODT&bid=8ebb171697ae822642c70c00e781c977> (дата обращения: 14.09.2025). DOI: 10.17223/25421379/25/5.
9. Степанова В.А., Волкова И.И. Генезис некоторых верховых болот лесостепи Западной Сибири (на примере Николаевского ряма) // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2017. № 40. С. 202–223. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/genezis-nekotoryh-verhovuyh-bolot>

- lesostepi-zapadnoy-sibiri-na-primere-nikolaevskogo-guama (дата обращения: 21.09.2025). DOI: 10.17223/19988591/40/12.
10. Наумов А.В. Косых Н.П., Паршина Е.К., Артымук С.Ю. Верховые болота лесостепной зоны, их состояние и мониторинг // Сибирский экологический журнал. 2009. Т. 16. № 2. С. 251–259. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12293664> (дата обращения: 14.09.2025). EDN: KJAOYH.
 11. Благовещенский И.В. Структура растительного покрова, систематический, географический и экологический анализ флоры болотных экосистем центральной части Приволжской возвышенности: автореф. дис. ... докт. биол. наук. Ульяновск, 2006. 41 с. URL: <https://new-dissert.ru/-avtoreferats/01003314113.pdf> (дата обращения: 14.09.2025).
 12. Благовещенская Н.В., Чернышев А.В. Динамика степной растительности центральной части Приволжской возвышенности в голоцене // Бюллетень МОИП. Отдел биологический. 2012. № 1. С. 50–58. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/dinamika-stepnoy-rastitelnosti-tsentralnoy-chasti-privolzhskoy-vozvyshennosti-v-golotsene> (дата обращения: 21.09.2025).
 13. Гришуткин О.Г. Болота Мордовии, заслуживающие охраны // Труды Мордовского государственного природного заповедника им. П.Г. Смидовича. 2016. № 17. С. 60–63. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/bolota-mordovii-zasluzhivayuschie-ohrany> (дата обращения: 21.09.2025).
 14. Благовещенский И.В. Растительность болота Бревово (Ульяновская область). Рекомендации по режиму охраны и использования // Известия Саратовского университета Новая серия. Серия Химия. Биология. Экология. 2020. № 4. С. 454–464. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rastitelnost-bolota-brevovo-ulyanovskaya-obl-tekhnicheskii-otchet> (дата обращения: 21.09.2025). DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2020-20-4-454-464>.
 15. Иванов А.И., Чистякова А.А. Моховые болота бассейна реки Суры в пределах Пензенской области и проблемы их охраны // Чистая вода: Проблемы и решения. 2010. № 4. С. 90–95. URL: <https://elibrary.ru/mwkcjj> (дата обращения: 21.10.2025).
 16. Красная книга Пензенской области: в 2 т. Изд. 2-е. Пенза; Воронеж: Воронежская областная типография – изд-во им. Е.А. Болховитинова, 2019. Т. 2: Животные / науч. ред. В.Ю. Ильин. 264 с. URL: https://minleshoz.pnzreg.ru/osnovnye-napravleniya/prirodyne-resursy-i-normirovaniye/krasnaya-kniga-penza-penzenskoy-obl/krasnaya%20kniga_c%20korrekturoy2.pdf EDN: KMGMWG (дата обращения: 14.09.2025). ISBN: 978-5-4420-0777-0.
 17. Горбушина Т.В., Куприянов А.Н. Растительность болота Вишневское (Кузнецкий район Пензенской области) // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. 2018. № 4-1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rastitelnost-bolota-vishnevskoe-kuznetskiy-rayon-penzenskoy-obl> (дата обращения: 14.09.2025).
 18. Спиридонова И.Н. Геоэкологическая оценка территории пензенской области // Форум молодых ученых. 2019. № 1–3 (29). С. 417–420. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/geoekologicheskaya-otsenka-territorii-penzenskoy-obl> (дата обращения: 21.09.2025).
 19. Ямашкин А.А., Артемова С.Н., Новикова Л.А., Леонова Н.А., Алексеева Н.С. Электронная ландшафтная карта Пензенской области // Известия ПГУ им. В.Г. Белинского. 2011. № 25. С. 665–673. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/elektronnaya-landschaftnaya-karta-penzenskoy-obl> (дата обращения: 22.09.2025).
 20. Старые карты России и Зарубежья: сайт Retromap [Электронный ресурс]. URL: <https://retromap.ru/> (дата обращения: 16.08.2025).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

УДК 911:332.142:332.3
DOI 10.17513/use.38448

ПРОЦЕДУРА ВНЕСЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ В ГЕНЕРАЛЬНЫЙ ПЛАН МУНИЦИПАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

¹Архипова В.С., ²Ларина А.В. ORCID ID 0009-0002-5038-3006,

²Тарасова О.Ю., ²Келин Е.Н., ²Скобликова А.В.

¹Акционерное общество «Республиканский центр пространственных данных «Кадастр»,
Саранск, Российской Федерации;

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва»,
Саранск, Российской Федерации, e-mail: larina2705@yandex.ru

В связи с изменением законодательства Российской Федерации, а также в целях актуализации данных, администрациями муниципальных образований разрабатываются предложения о внесении изменений в утвержденные генеральные планы. Цель данной работы заключается в анализе технической подготовки проекта внесения изменений в генеральный план муниципального образования на примере Татарско-Тавлинского сельского поселения Лямбирского района Республики Мордовия в связи с несогласием ранее утвержденной документации законодательству Российской Федерации по вопросам фактического использования территории сельского поселения. Процесс разработки проектной документации проводился в три этапа: предварительный, проектный и заключительный. После подписания договора на выполнение работ по подготовке проектной документации были проведены природный и социально-экономический анализы территории сельского поселения, далее осуществлялась оцифровка графической части генерального плана и подготовка его текстовой части. Графическая часть разрабатывалась в программном комплексе MapInfo Professional с использованием системы «Территориальное планирование», утилиты SmartPanels. В результате работ составлены карты: границ населенных пунктов (в том числе границ образуемых населенных пунктов); функциональных зон; планируемого размещения объектов местного значения; категорий земель; зон с особыми условиями использования территорий; территорий, подверженных риску возникновения чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера. По завершении проектирования были подготовлены gml-файлы для выгрузки в Федеральную государственную информационную систему территориального планирования и проведение процедуры дальнейшего утверждения генерального плана. Техническая подготовка проекта генерального плана является трудоемким и ответственным процессом, от которого напрямую зависит качество документа, его утверждение и дальнейшее использование.

Ключевые слова: территориальное планирование, социально-экономическое развитие, генеральный план, сельское поселение, функциональные зоны, документы территориального планирования

PROCEDURE FOR AMENDING THE GENERAL PLAN OF A MUNICIPALITY

¹Arhipova V.S., ²Larina A.V. ORCID ID 0009-0002-5038-3006,

²Tarasova O.Yu., ²Kelin E.N., ²Skoblikova A.V.

¹Joint-Stock Company “Republican Spatial Data Center “Cadastre”, Saransk, Russian Federation;

²Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education

“Ogarev National Research Mordovian State University”,

Saransk, Russian Federation, e-mail: larina2705@yandex.ru

In connection with the change of legislation of the Russian Federation, as well as in order to update the data, the administrations of municipalities develop proposals for amendments to the approved master plans. The purpose of this work is to analyze the technical preparation of the project for amendments to the master plan of a municipality on the example of the Tatar-Tavlinsky rural settlement of the Lyambirsky district of the Republic of Mordovia, in connection with the inconsistency of the previously approved documentation with the legislation of the Russian Federation on the actual use of the territory of the rural settlement. The process of developing project documentation was carried out in three stages: preliminary, design, and final stages. After signing the contract for the preparation of project documentation, natural and socio-economic analyses of the rural settlement territory were carried out, followed by the digitization of the graphic part of the master plan and the preparation of its textual part. The graphic part was developed using the MapInfo Professional software package and the Territorial Planning system, as well as the SmartPanels utility. As a result of the work, maps were compiled of the boundaries of settlements (including the boundaries of newly formed settlements), functional zones, planned locations of local facilities, land categories, zones with special conditions for the use of territories, and territories at risk of natural and man-made emergencies. Upon completion of the design, gml files were prepared for uploading to the Federal State Information System for Territorial Planning and for further approval of the master plan. The technical preparation of the master plan is a time-consuming and responsible process that directly affects the quality of the document, its approval, and its subsequent use.

Keywords: territorial planning, socio-economic development, master plan, rural settlement, functional zones, territorial planning documents

Введение

В соответствии с Градостроительным кодексом Российской Федерации [1] документы территориального планирования, к которым относятся генеральные планы и схемы территориального планирования, разрабатываются на разных уровнях власти: федеральном, региональном и местном. Генеральный план представляет собой документ, который содержит в себе информацию о развитии программ (стратегий), инвестиционных программах территории городского или сельского поселения либо городского округа, функциональном зонировании территории, развитии инженерных и транспортных инфраструктур, наличии объектов культурного наследия, памятников природы, полезных ископаемых и т. д. [2; 3].

Цель исследования – провести анализ технической подготовки проекта внесения изменений в генеральный план муниципального образования на примере Татарско-Тавлинского сельского поселения Лямбирского муниципального района Республики Мордовия в связи с несоответствием ранее утвержденной документации законодательству Российской Федерации по вопросам фактического использования территории сельского поселения.

Материалы и методы исследования

Разработка генерального плана или внесение изменений в генеральный план сельского поселения предполагает комплексные работы по созданию комфортной среды для населения [4]. Процедура внесения изменений в генеральный план проходила на основании Решения Администрации сельского поселения «О внесении изменений в генеральный план Татарско-Тавлинского сельского поселения Лямбирского муниципального района Республики Мордовии» от 3 июля 2024 года.

Процесс разработки проектной документации осуществлялся в несколько этапов [5]: *предварительный этап*, включающий в себя заключение контракта между исполнителем (разработчиком проекта) и заказчиком (Администрацией сельского поселения); *проектный этап*, на котором происходит сбор исходных данных (схем водоснабжения, теплоснабжения, электроснабжения и т. д.), подготовка графической и текстовой частей генерального плана, графическое описание границ населенного пункта; *заключительный этап* предусматривает выгрузку проекта генерального плана в Федеральную государственную ин-

формационную систему территориального планирования (далее – ФГИС ТП), проведение публичных слушаний и утверждение генерального плана [6].

Результаты исследования и их обсуждение

Исследуемая территория расположена в юго-восточной части Лямбирского муниципального района Республики Мордовия, площадь территории Татарско-Тавлинского сельского поселения составляет 18,488 км², в него входит один населенный пункт – с. Татарская Тавла.

Согласно статистическим данным, численность населения в сельском поселении последние 20 лет идет на спад, что вызвано миграцией и высоким уровнем смертности. Социальная инфраструктура развита слабо, имеется школа, клуб, ФАП, библиотека, отделение почтовой связи; инженерная и транспортная инфраструктуры представлены водо-, газо-, электроснабжением, автодорогами межрегионального значения, железнодорожная сеть отсутствует. Территория поселения пригодна для ведения сельского хозяйства благодаря плодородным почвам, полезные ископаемые отсутствуют.

После природного и социального-экономического анализа территории сельского поселения осуществлялась оцифровка графической части генерального плана и подготовка текстовой части. Графическая часть готовилась в программном комплексе MapInfo Professional (версия 15.0) с использованием системы «Территориальное планирование», утилиты SmartPanels [7; 8].

Проектом внесения изменений в генеральный план предусматривалась разработка следующих карт: границ населенных пунктов (в том числе границ образуемых населенных пунктов); функциональных зон; планируемого размещения объектов местного значения; категорий земель; зон с особыми условиями использования территории; территорий, подверженных риску возникновения чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера.

Оцифровке на «Карте границ населенных пунктов» (в том числе границ образуемых населенных пунктов) подлежат границы сельского поселения, границы всех населенных пунктов в его составе, информация о земельных участках, сведения о местоположении границ которых имеются в ЕГРН, а также содержатся в кадастровых планах территории кадастровых кварталов, входящих в состав территории Татарско-Тавлин-

ского сельского поселения; для визуализации используется ортофотоплан (космический снимок).

Все объекты, которые отображены на картах, соответствуют условным знакам, установленным Приказом Минэкономразвития России от 09.01.2018 г. № 10 [9]. Согласно Приказу Минэкономразвития России от 06.05.2024 г. № 273 [10] для каждого элемента оцифровки использовался свой слой

(например, для границ сельского поселения и населенных пунктов использовался слой AdmBorder). Также для каждого слоя применялся свой стиль линий, в программном комплексе MapInfo Professional имеется библиотека стилей линий и точечных объектов.

После оцифровки всех элементов карты создается легенда, карта выгружается в читаемом масштабе (рис. 1).



Рис. 1. Генеральный план Татарско-Тавлинского сельского поселения Лямбирского района Республики Мордовия. Карта границ населенных пунктов М 1:5000
Источник: составлено авторами по результатам данного исследования

Код объекта	Значение	Условные обозначения
701010100	Жилые зоны	
701010300	Общественно-деловые зоны	
701010405	Зона транспортной инфраструктуры	
701010503	Производственная зона сельскохозяйственных предприятий	
701010701	Зона кладбищ	
701010600	Зоны рекреационного назначения	

Рис. 2. Проектируемые функциональные зоны Татарско-Тавлинского сельского поселения
Источник: составлено авторами по результатам данного исследования

На «Карте функционального зонирования» отображаются функциональные зоны сельского поселения, улично-дорожная сеть, гидрография. Карта функциональных зон в генеральном плане поселения должна быть соотнесена с картой градостроительного зонирования в правилах землепользования и застройки этого поселения [11].

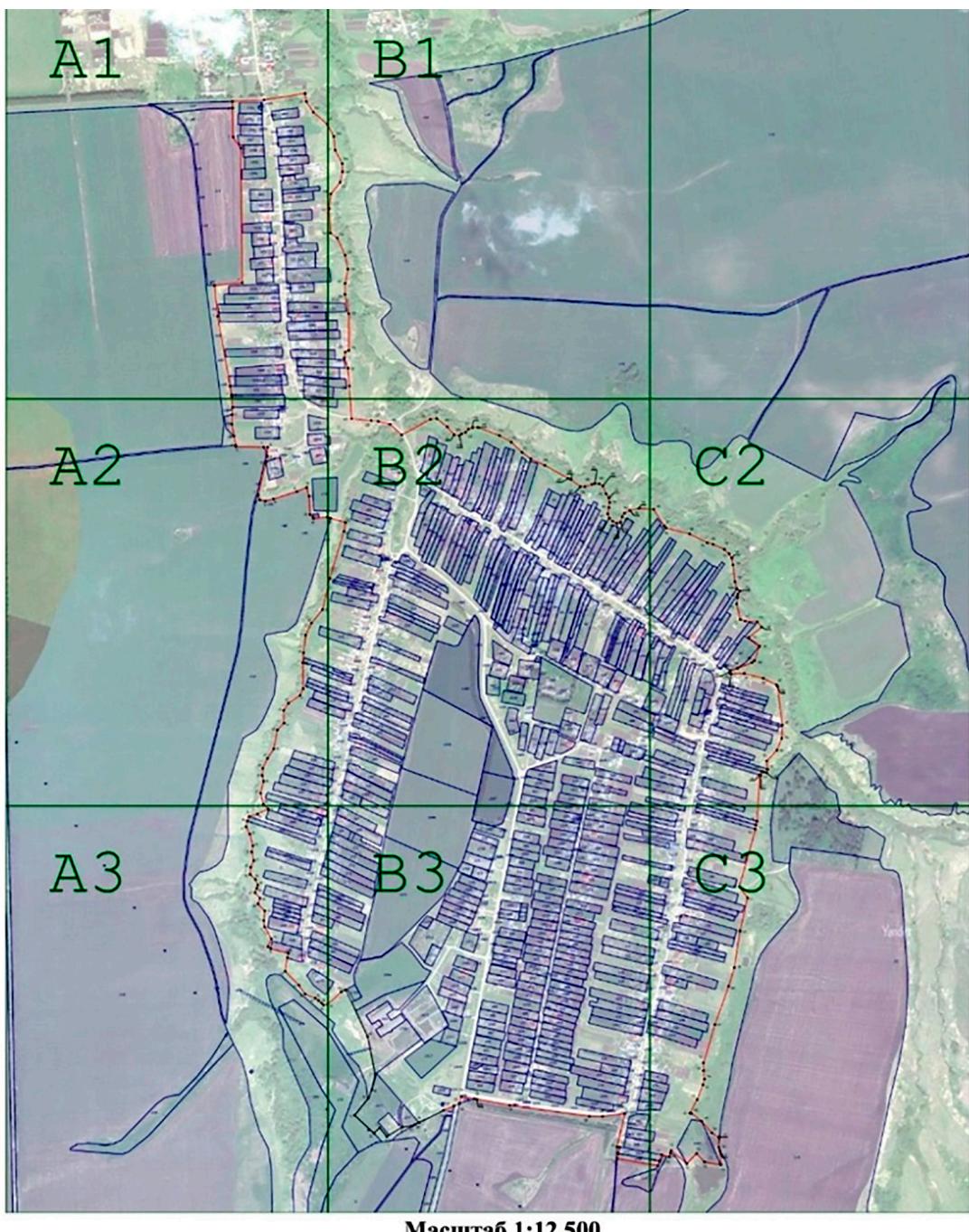
Для оцифровки слоя «функциональные зоны» используется слой FunctionalZone, для удобства проектирования используется инструмент «Информация» в программном комплексе MapInfo Professional, далее выбирается любой земельный участок, объект капитального строительства и появляется информационное табло с основной информацией об объекте недвижимости. Проектом генерального плана выделяется шесть функциональных зон (рис. 2).

На территории Татарско-Тавлинского сельского поселения большую часть территории занимают жилые зоны. Согласно СП 42.13330.2016 [12] жилые зоны проектируется в целях создания для населения удобной, здоровой, безопасной среды проживания. Проектом генерального плана предусмотрено увеличение жилой зоны за счет включения земельных участков со следующими кадастровыми номерами: 13:15:0103002:1996; 13:15:0103002:1968; 13:15:0103002:1997; 13:15:0103002:1969; 13:15:0103002:1970.

К общественно-деловым зонам относятся территории, где размещаются административные здания, средние профессиональные и высшие учебные заведения, спортивные объекты, здания здравоохране-

ния и культуры, торговые центры, рестораны и кафе, объекты социальной сферы и т. д. [13]. В зоне транспортной инфраструктуры выделяются автомобильные дороги. В производственную зону сельскохозяйственных предприятий входят здания, постройки и сооружения, которые используются для производства, хранения и первичной обработки сельскохозяйственной продукции. В состав зон кладбищ входят земельные участки, предназначенные для целей захоронения и крематориев. В зону рекреационного назначения предусмотрено включение земельного участка с кадастровым номером 13:15:0103001:293 в целях развития агротуризма. Также оцифровке подлежат земли сельскохозяйственного назначения. После оцифровки всех функциональных зон выгружается карта в читаемом масштабе.

Далее идет оцифровка «Карты планируемого размещения объектов местного значения», содержащая информацию о современном состоянии инженерной, транспортной, социальной инфраструктуры сельского поселения, а также планируемых к размещению, реконструкции или ликвидации объектов местного, регионального или федерального значения. При оцифровке данной карты следует ориентироваться на Схемы территориального планирования регионального и муниципального значения, а также программы (стратегии) развития, инвестиционные проекты. Согласно данным документам, на территории Татарско-Тавлинского сельского поселения отсутствуют планируемые к размещению, реконструкции, ликвидации объекты.



Используемые условные знаки и обозначения:

- Существующая часть границы, имеющиеся в ЕГРН сведения о которой достаточны для определения ее местоположения
- Вновь образованная часть границы, сведения о которой достаточны для определения ее местоположения
- Характерная точка границы, сведения о которой позволяют однозначно определить ее положение на местности

Рис. 3. Графическое описание границ населенного пункта
Источник: составлено авторами по результатам данного исследования

Так как отсутствуют планируемые объекты, в таком случае «Карта планируемого размещения объектов местного значения» будет содержать в себе информацию о планируемых функциональных зонах и о современном состоянии сельского поселения.

«Карта категорий земель» отображает земельные участки по их категориям [14]. В проекте выделяются три категории земель: земли населенных пунктов, земли сельскохозяйственного назначения, земли промышленности, энергетики, транспорта, связи, радиовещания, телевидения и иного специального назначения.

Для подготовки графического описания границ населенного пункта изображение границы с. Татарская Тавла импортируется из среды программного обеспечения MapInfo Professional и подгружается в программный комплекс АРГО. Сведения о границах населенного пункта содержат в себе: графическое описание и информацию о поворотных точках объекта, список координат, местоположение, площадь объекта и погрешность (рис. 3).

При проектировании «Карты зон с особыми условиями использования территории» отображаются следующие зоны: для объектов гидрографии отображаются прибрежные защитные полосы, береговые полосы, водоохраные зоны; зоны для линий электропередач; придорожные полосы для автомобильных дорог; охранные зоны объектов электросетевого хозяйства; охранная зона водопроводных сетей; зоны санитарной охраны и защиты; охранные зоны для линий связи и сооружений связи; охранные зоны газопроводов высокого, среднего и низкого значения; приаэродромная территория аэродрома гражданской авиации «Саранск». На момент проектирования большая часть охранных зон была внесена в ЕГРН, остальные охранные зоны отображались согласно действующему законодательству.

На «Карте территорий, подверженных риску возникновения чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» отображают слой с кодовым наименованием TechnoRiskArea.

Заключительный этап проектирования включает в себя подготовку гml-файлов для выгрузки в ФГИС ТП. После опубликования проекта генерального плана объявляют о проведении публичных слушаний (срок которых не может превышать один месяц), далее принимается решение об утверждении генерального плана [15]. После утверждения генерального плана в ФГИС ТП подгру-

жаются Постановление об утверждении генерального плана и редактированная версия проекта генерального плана, с учетом всех исправленных замечаний и предложений, полученных в ходе проведения публичных слушаний, после чего генеральный план получает статус «Действующий», а ранняя его версия получает статус «Неактуальная редакция».

Заключение

Генеральный план является одним из документов территориального планирования, который содержит в себе информацию о комплексном развитии муниципального образования. В связи с тем, что генеральный план муниципального образования разрабатывается на длительный срок, при возможных изменениях законодательства Российской Федерации или при актуализации данных, содержащихся в документе, возникает необходимость внесения изменений в генеральный план.

Процесс внесения изменений в генеральный план муниципального образования должен осуществляться в строгом соответствии с требованиями, указанными в Градостроительном кодексе Российской Федерации, нормативно-правовых документах Минэкономразвития России, сводах правил по градостроительству и других документах. Проектом внесения изменений в генеральный план сельского поселения предусматривается проведение социально-экономического и природного анализа территории муниципального образования, дальнейшая оцифровка графической части генерального плана и подготовка его текстовой части. Техническая подготовка проекта генерального плана муниципального образования идет в несколько этапов, является трудоемким и ответственным процессом, от которого напрямую зависит качество документа, его утверждение и дальнейшее использование.

Список литературы

- Градостроительный кодекс Российской Федерации // Федеральный закон от 29 декабря 2004 г. № 190-ФЗ (с изменениями на 31 июля 2025 года) [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.ctnd.ru/document/901919338> (дата обращения: 25.09.2025).
- Абрамова А.В. Документы территориального планирования на уровне муниципальных образований // Международный журнал прикладных наук и технологий «Integral». 2021. № 2 (2). С. 7-12. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/dokumenty-territorialnogo-planirovaniya-na-urovne-munitsipalnyh-obrazovaniy/viewer> (дата обращения: 27.09.2025).
- Соболь Т.С., Чебыкина Ю.В. Особенности территориального планирования Российской Федерации на основе градостроительной деятельности // Научный вестник:

- финансы, банки, инвестиции. 2020. № 4 (53). С. 95-103. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-territorialnogo-planirovaniya-rossiyskoy-federatsii-na-osnove-gradostroitelnoy-deyatelnosti/viewer> (дата обращения: 25.09.2025).
4. Скакодуб Н.Р. Мастер-план как непоименованный инструмент градостроительного планирования // Имущественные отношения в РФ. 2024. № 12 (279). С. 67-74. URL: <https://sciup.org/170207818> (дата обращения: 25.09.2025).
5. Батин Д.А., Масляев В.Н., Борисова Е.А., Ушаков Р.С. Территориальное планирование использования земель сельского муниципального образования // Научное обозрение. Международный научно-практический журнал. 2020. № 3. С. 2-11. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/territorialnoe-planirovaniye-ispolzovaniya-zemel-selskogo-munitsipalnogo-obrazovaniya/viewer> (дата обращения: 20.09.2025).
6. Скакодуб Н.Р. О едином документе территориального планирования и градостроительного зонирования на муниципальном уровне // Имущественные отношения в РФ. 2024. № 7 (274). С. 18-24. URL: <https://sciup.org/170207863> (дата обращения: 25.09.2025).
7. Манаев Э.Ф., Вильданов И.Р. Функционал ГИС MapInfo в составлении тематических карт // JSRP. 2015. № 3 (23). С. 101-105. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/funktional-gis-mapinfo-v-sostavlenii-tematicheskikh-kart> (дата обращения: 29.09.2025).
8. Эфириян Р.А., Тамазова А.Д., Бескоровайная Е.С. Разработка и утверждение генерального плана муниципального образования // Современная научная мысль. 2021. № 6. С. 191-200. DOI: 10.24412/2308-264X-2021-6-197-200. EDN: HVSLNP.
9. Приказ Минэкономразвития России от 09.01.2018 г. № 10 «Об утверждении Требований к описанию и отображению в документах территориального планирования объектов федерального значения, объектов регионального значения, объектов местного значения» [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/542615978>. (дата обращения: 25.09.2025).
10. Приказ Минэкономразвития России от 06.05.2024 г. № 273 «Об утверждении Методических рекомендаций по разработке проектов схем территориального планирования муниципальных районов, генеральных планов городских округов, муниципальных округов, городских и сельских поселений» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/408926338/> (дата обращения: 26.09.2025).
11. Лептюхова О.Ю. Правовые основы подготовки и взаимосвязь функционального и градостроительного зонирования // Экология урбанизированных территорий. 2022. № 4. С. 70-77. DOI: 10.24412/1816-1863-2022-4-70-77.
12. СП 42.1330.2016. Свод правил. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений от 01.07.2017 г. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456054209> (дата обращения: 26.09.2025).
13. Овчинникова Н.Г. Планировка функциональных зон населенных мест с целью устойчивого развития территорий // Экономика и экология территориальных образований. 2023. № 1. С. 59-66. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/planirovka-funktionalnyh-zon-naselennyh-mest-s-tselyu-ustoychivogo-razvitiya-territoriy/viewer> (дата обращения: 25.09.2025).
14. Богоявленская Е.М., Пискунова М.Г. Практические аспекты определения категорий земель // Имущественные отношения в РФ. 2014. № 3 (150). С. 44-57. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/prakticheskie-aspekty-opredeleniya-kategorii-zemel/viewer> (дата обращения: 25.09.2025).
15. Чернышов В.А., Сегал О.А. К вопросу о пределах учета результатов публичных слушаний и общественных обсуждений при территориальном планировании и градостроительном зонировании поселения // Вестник Удмуртского университета. Серия «Экономика и право». 2024. Т. 34. № 6. С. 1149-1155. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-o-predelah-ucheta-rezulatov-publichnyh-slushaniy-i-obschestvennyh-obsuzhdeniy-pri-territorialnom-planirovaniyu-i-1/viewer> (дата обращения: 25.09.2025).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

УДК 911.6:528(470.325)
 DOI 10.17513/use.38449

**ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ЛАНДШАФТНОЙ СТРУКТУРЫ
 СЕЛЬСКИХ И ГОРОДСКИХ ПОСЕЛЕНИЙ
 ЦЕНТРАЛЬНО-ЧЕРНОЗЕМНОЙ ЗОНЫ РОССИИ
 (НА ПРИМЕРЕ БЕЛГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ)**

Дроздова Е.А., Титов Б.О., Гененко М.А.

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
 «Белгородский государственный национальный исследовательский университет»,
 Белгород, Российская Федерация, e-mail: drozdova@bsuedu.ru*

В статье рассмотрены вопросы трансформации ландшафтной структуры сельских и городских поселений Новооскольского городского округа Белгородской области за последние 60 лет. Основное внимание уделено эволюции функциональной структуры территории, вызванной социально-экономическими изменениями региона. Цель исследования – оценка и анализ происходящих за последние 60 лет изменений в структурно-ландшафтных особенностях как сельских поселений, так и в целом городских территорий на примере Новооскольского городского округа Белгородской области. Исследовательские методики охватывают анализ исторических карт, сравнение разновозрастных спутниковых снимков и моделирование пространственно-временного развития ландшафтов. Проведен анализ изменений площадных и пространственных особенностей распределения сельскохозяйственных угодий, лесных массивов, водоемов и жилых зон. Результаты исследования показали значительный рост доли городской застройки с инфраструктурным блоком и сокращение малых поселений. Замечен устойчивый тренд уплотнения отдельных районов и трансформации традиционно аграрных участков в жилые зоны. Выводы подчеркнули актуальность проведения пространственно-временных исследований ландшафтной структуры сельских поселений при определении долгосрочных тенденций регионального развития при разработке стратегий устойчивого управления территориями. В заключении авторами подтверждена необходимость комплексного подхода к регулированию землепользования и планированию ландшафтных зон, учитывая баланс экономических нужд и возможный ущерб и деградационные риски локальным геосистемам.

Ключевые слова: агроландшафт, антропогенная нагрузка, Белгородская область, ландшафтная структура, земельный фонд, сельские территории

**ASSESSMENT OF LANDSCAPE STRUCTURE CHANGES
 IN OLD-ESTABLISHED RURAL AND URBAN
 SETTLEMENTS OF CENTRAL CHERNOZEM RUSSIA
 (CASE STUDY OF BELGOROD REGION)**

Drozdova E.A., Titov B.O., Genenko M.A.

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
 “Belgorod State National Research University”,
 Belgorod, Russian Federation, e-mail: drozdova@bsuedu.ru*

The article examines the transformation of the landscape structure in rural and urban settlements of the Novooskolsky urban district of the Belgorod region over the past 60 years. The primary focus is on the evolution of the territory's functional structure driven by the socio-economic changes in the region. The research aimed to assess and analyze the changes that have occurred over the past 60 years in the structural and landscape features of both rural settlements and urban areas, using the Novooskolsky urban district as a case study. The research methodology involved the analysis of historical maps, comparison of multi-temporal satellite imagery, and modeling of spatiotemporal landscape dynamics. The study analyzed changes in the area and spatial distribution of agricultural land, forests, water bodies, and residential zones. The main results revealed a significant increase in the proportion of urban development with its infrastructure and a reduction in small settlements. A consistent trend of densification in certain districts and the transformation of traditionally agrarian areas into residential zones was observed. The conclusions highlighted the relevance of spatiotemporal studies of the landscape structure of rural settlements for identifying long-term regional development trends and for designing sustainable land management strategies. In conclusion, the authors confirmed the necessity of an integrated approach to land-use regulation and landscape zoning planning, which balances economic needs with potential damage and degradation risks to local geosystems.

Keywords: agrolandscape, anthropogenic load, Belgorod region, land fund, landscape structure, rural territories

Введение

Определение функциональных зон служит фундаментом для устойчивого управления территориями, что делает эту задачу стратегически важной для государственной и региональной политики. Решению

данной задачи в значительной степени способствует применение геоинформационных технологий, которые позволяют проводить комплексную оценку землепользования для последующего принятия управленческих решений [1].

Существующие научные труды охватывают широкий спектр вопросов, связанных с зонированием и развитием сельских территорий. Так, в трудах С.Н. Волкова и А.А. Варламова [2] можно встретить основы представлений о зонировании земель и изучении вопросов территориального планирования; С.И. Комаров развивал представление об экологическом зонировании и геоэкологическом районировании [3, с. 33, 55; 4]; С.Г. Шеина – представления о методологических вопросах изучения агроландшафтов в целях устойчивого землепользования [5]; С.А. Дубровская – вопросы ландшафтного зонирования для устойчивого развития [6]. При этом недостаточно внимания уделено вопросам трансформации функциональной структуры территорий в современном этапе развития.

На примере Белгородской области особенно очевидна актуальность изучения трансформации территорий. Регион, в его современных границах, был образован в 1954 г. [7], что совпало с периодом активной индустриализации. Ключевым фактором преобразований стало освоение месторождений Курской магнитной аномалии, в частности строительство в 1970-е гг. Лебединского и Стойленского горно-обогатительных комбинатов [8, с. 42]. Наряду с промышленным развитием интенсифицировалось и сельское хозяйство – традиционная для Центрально-Черноземной полосы отрасль, что выражалось в росте доли пахотных угодий [9].

Таким образом, именно на послевоенные десятилетия пришлись наиболее масштабные изменения агроландшафтов, которые за последние 60 лет трансформировали структуру землепользования из чисто аграрных поселений в многофункциональные образования с развитой инфраструктурой [7]. Совокупность этих процессов привела к изменению функционально-ландшафтного облика региона, что обуславливает необходимость не только оценки текущего состояния агроценозов, но и разработки прогноза их дальнейшего развития [10].

Цель исследования – оценка и анализ происходящих за последние 60 лет изменений в структурно-ландшафтных особенностях как сельских поселений, так и в целом городских территорий на примере Новооскольского городского округа Белгородской области.

Материалы и методы исследования

Рассматриваемый Новооскольский городской круг – типичное аграрно-ориентированное муниципальное образование, находясь на достаточном отдалении от об-

ластного центра (более 100 км) и от горно-промышленных узлов, он лишь косвенно испытывал на себе влияние последних [7]. Среди особенностей территории можно отметить одну из самых больших в области степеней расчлененности рельефа овражно-балочными формами (с сопутствующим активным проявлением плоскостной и струйчатой эрозии), наличие обширных речных долин и приуроченность к лесостепной зоне Центрального Черноземья [8; 11]. Доля городского населения в округе составляет 45 % от 41 198 жителей [7].

Методическая база работы основывалась на пространственно-временном изучении структурно-ландшафтных особенностей на основе ГИС-анализа и моделирования. При оценке трансформации функциональной структуры Новооскольского городского округа выбрано три временных среза через 20- и 30-летний интервал – 2018, 1998 и 1956 гг. Источником данных за 2018 г. послужили многозональные снимки Landsat 8. Снимки были получены через сервис Earth Explorer Геологической службы США. Исходным материалом предыдущего временного среза являлись космические снимки свободного доступа со спутника Landsat 7. Исследование функционального зонирования территории 1956 г. проводилось по топографическим картам масштаба 1 : 25 000 – 1 : 100 000 [1].

Результаты исследования и их обсуждение

В структуре землепользования Новооскольского городского округа в 1956 г. преvalировали земли под пашней, как в традиционно аграрном регионе [9], составляя около 62 % площади округа, существенные площади заняты под овражно-балочной сетью – более 16 %, на долю населенных пунктов в структуре городского округа приходилось только 7 % территории, лесные массивы составляли 9,6 %. При сравнении результатов проведенных авторами оценок, по данным ДЗЗ и топографическим картам Новооскольского округа за 1956 и 1998 гг. (табл. 1), существенных изменений за первые 30 лет не было отмечено, при этом можно отметить общие тенденции к увеличению площадей водных объектов (за счет строительства прудов) и доли пашни; незначительно снизилась площадь таких функциональных зон, как лесные массивы (на более чем 600 га), незначительно – овражно-балочных комплексов, населенных пунктов, пастбищ и сенокосов (менее чем на 0,1 %).

Таблица 1

Экспликация земель Новооскольского городского округа по данным визуального дешифрирования за 1956–2018 гг.

Тип угодий	1956 г.		1998 г.		2018 г.	
	Площадь, %	Площадь, га	Площадь, %	Площадь, га	Площадь, %	Площадь, га
Водные объекты	0,9	760	1,1	772	1	812
Лесные массивы	9,6	13 463	9,1	12 778	9,6	13 455
Пашня	61,9	86 708	62,5	87 654	54,8	76 845
Пастбища и сенокосы	4,3	6601	4,2	6010	5	7008
Овражно-балочная сеть	16,1	22 599	16	22 565	18,5	26 511
Населенные пункты	7,2	10 029	7,1	10 381	11,1	15 529
Итого	100	140 160	100	140 160	100	140 160

Примечание: составлена авторами на основе данных топографических карт и ДЗЗ.

Таким образом, «осью», вокруг которой выстраиваются самые крупные поселения, в том числе г. Новый Оскол, является р. Оскол, протекающая с севера на юг и разделяющая территорию на две примерно одинаковые части.

Более мелкие поселения тяготеют к притокам р. Оскол – р. Холок, Плотва, Беленькая, Усердец. По состоянию на 2018 г. отмечалось существенное увеличение площади поселений, увеличилась площадь самого г. Новый Оскол за счет активного индивидуального строительства. Села – спутники г. Новый Оскол зачастую имеют общую границу, постепенно сменяя друг друга, протягиваясь узкими полосами вдоль рек. В настоящее время площадь населенных пунктов составляет 15 529 га, или 11,1% площади округа. Отмечается определенный рост и территории пастбищ и сенокосов, и овражно-балочной сети – на 2,5% территории. Можно предположить, что такой рост вышеописанных функциональных зон происходит за счет изъятия из оборота сельскохозяйственных земель под строительство и в связи с увеличением эродированности, сейчас на долю пашни приходится 54,8% земель округа, отмечается снижение ее площади практически на 8%. Незначительно, до первоначальных цифр, выросла площадь лесов, и практически постоянной остается площадь водных объектов.

Для крупномасштабной оценки изменения ландшафтной структуры Новооскольского городского округа были выбраны два поселения, одно из которых является городским [12]. Город Новый Оскол расположен на левом берегу р. Оскол, бассейна Северского Донца. Большеивановская сельская территория находится в восточной части городского округа – одна из наиболее возвы- шенных и рассеченных территорий округа.

В ее состав входят шесть населенных пунктов в долине р. Усердец: с. Большая Ивановка, с. Семеновка, х. Мосыпанов, х. Колодезный, с. Боровое, х. Редкодуб, население составляет 1070 чел. [8, с. 116]. Дистанционные исследования были подкреплены точечными полевыми выездами в целях верификации полученных данных.

На рис. 1 приведены картографические материалы по пространственно-временному развитию г. Новый Оскол за период с 1956 по 2018 г. Исследование показало значительные преобразования функциональных зон городского поселения Новый Оскол Белгородской области за последние десятилетия. Визуальное дешифрирование спутниковых снимков позволило выявить важные тенденции, отражающие изменение характера землепользования и рост городской инфраструктуры. За исследуемый период значительно выросла территория жилой зоны. Если в 1956 г. эта зона занимала всего 22%, то к 2018 г. ее удельный вес увеличился практически вдвое, почти до 50%. Это связано главным образом с притоком населения из близлежащих сел, увеличением плотности застройки и созданием новых жилых районов. Так, площадь жилой зоны увеличилась с 537,14 га в 1956 г. до 1203,82 га в 2018-м.

Площадь земель сельскохозяйственного назначения сократилась существенно. Ранее преобладающая роль пахотных угодий, пастбищ и сенокосов постепенно снизилась ввиду активного перераспределения земли под жилищное строительство и расширение границ населенного пункта. К примеру, если в 1956 г. эти земли составляли значительную долю площади, то к 2018 г. большая часть сельскохозяйственных угодий перешла в частную собственность застройщиков.

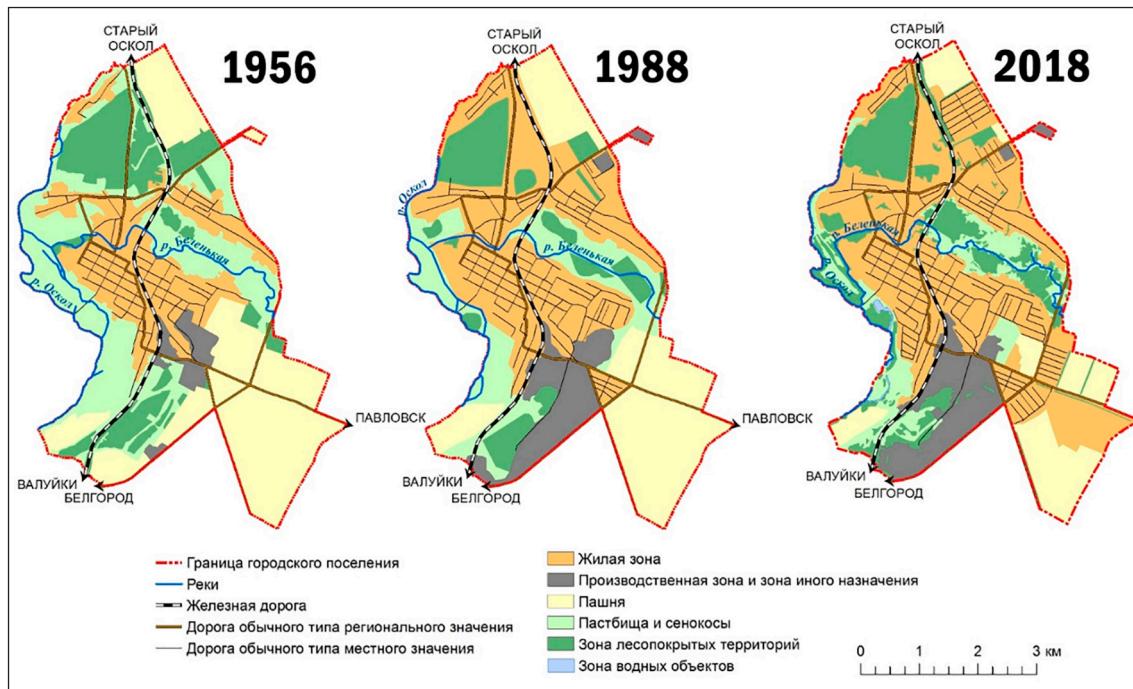


Рис. 1. Структурно-ландшафтное зонирование городского поселения «Город Новый Оскол» по данным на 1956, 1988 и 2018 гг.

Примечание: составлен авторами на основе полученных данных в ходе исследования

Таблица 2

Экспликация земель городского поселения «Город Новый Оскол» по данным визуального дешифрирования за 1956, 1988 и 2018 гг.

Тип угодий	Городское поселение «Город Новый Оскол»					
	1956 г.		1988 г.		2018 г.	
	Площадь, %	Площадь, га	Площадь, %	Площадь, га	Площадь, %	Площадь, га
Жилая зона	22,00	537,14	38,26	934,14	49,3	1203,82
Производственная зона	3,22	78,38	9,35	228,32	9,71	237,00
Пашня	30,29	739,70	25,09	612,70	12,59	307,41
Пастбища и сенокосы	29,49	719,95	15,24	372,13	10,66	260,28
Овражно-балочная сеть	—	—	—	—	—	—
Зона лесопокрытых территорий	15,00	366,47	12,06	294,35	17,51	427,50
Пруды	—	—	—	—	0,23	5,63
ИТОГО	100,00	2441,64	100,00	2441,64	100,00	2441,64
*Длина автодороги, км	53,94		67,84		85,49	
*Длина реки, км	17,02		14,17		13,47	

Примечание: составлена авторами на основе данных топографических карт и ДЗЗ.

Интересная динамика наблюдалась и в изменении площади лесопокрытых территорий. Общая тенденция роста лесов заметна. Например, в 1956 г. леса покрывали порядка 15 % территории, в 1988 г. этот показатель снизился до 12,06 %, од-

нако к 2018 г. вновь вырос до 17,51 % (табл. 2). Увеличение доли лесопокрытых территорий объясняется восстановительными процессами вдоль р. Оскол, процессами активного самозарастания оврагов и балок [13].

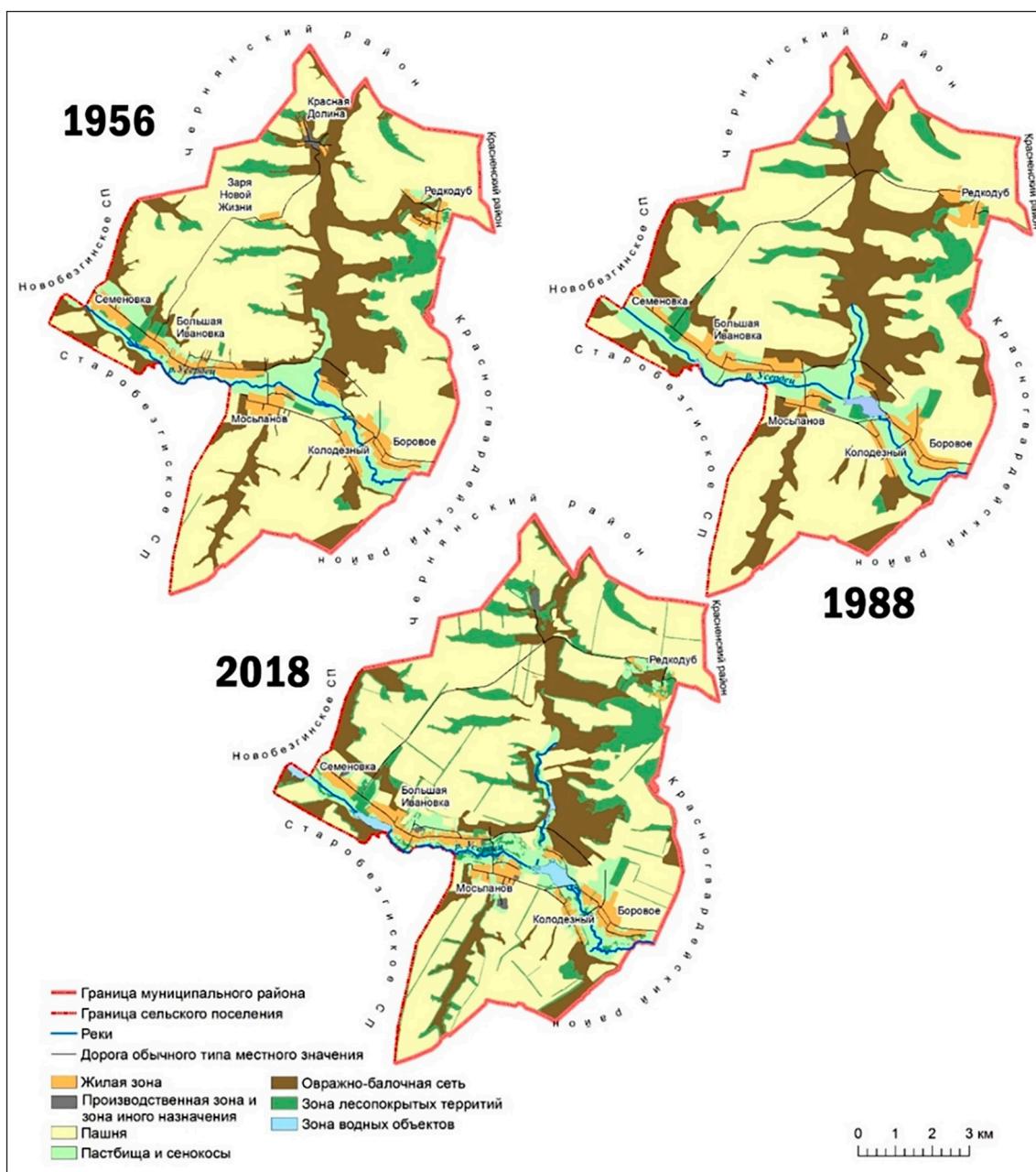


Рис. 2. Структурно-ландшафтное зонирование Большевановской сельской территории по данным на 1956, 1988 и 2018 гг.

Примечание: составлен авторами на основе полученных данных в ходе исследования

Производственная зона также претерпела значимые изменения. Начиная с минимальных значений в 1956 г. (около 3 %), доля промышленных объектов стабильно увеличивалась. По состоянию на 2018 г. промышленная зона занимает около 10 % общей площади. Территории, занятые оврагами и балками, в городе отсутствуют.

Таким образом, исследования подтверждают тезис об интенсивных процессах урбанизации [7], сопровождающихся пре-

образованием традиционного аграрного ландшафта и формированием современной городской среды в типичном малом городском поселении Белгородской области.

Аналогичным образом, методом визуального дешифрирования, были созданы карты структурно-ландшафтного зонирования Большевановской сельской территории (СТ) по данным топографических карт за 1956, 1988 гг. и по данным космической съемки за 2018 г. (рис. 2).

Таблица 3

Экспликация земель Большевановской сельской территории по данным визуального дешифрирования за 1956, 1988 и 2018 гг.

Тип угодий	Большевановская сельская территория					
	1956 г.		1988 г.		2018 г.	
	Площадь, %	Площадь, га	Площадь, %	Площадь, га	Площадь, %	Площадь, га
Жилая зона	5,06	466,26	4,72	435,03	3,91	362,76
Производственная зона	0,12	11,17	0,25	23,47	0,29	27,37
Пашня	64,18	5912,45	58,48	5387,59	57,39	5286,37
Пастбища и сенокосы	7,12	656,30	8,37	771,22	7,15	658,74
Овражно-балочная сеть	17,95	1653,96	20,82	1917,50	16,40	1510,51
Зона лесопокрытых территорий	5,57	511,90	6,96	640,37	13,96	1285,82
Пруды	—	—	0,40	36,86	0,90	80,47
ИТОГО	100,00	9212,04	100,00	9212,04	100,00	9212,04
*Длина автодороги, км	44,54		40,78		42,18	
*Длина реки, км	14,06		13,56		13,99	

Анализ динамики землепользования Большевановского сельского поселения (табл. 3) выявил существенные трансформации его структуры. Динамика лесопокрытых территорий демонстрирует устойчивую положительную тенденцию. Если в 1956 г. их доля составляла лишь 5,57% (511,90 га) вследствие интенсивных рубок, то к 2018 г. показатель вырос до 13,96% (1285,82 га). Рост обусловлен как естественным разрастанием лесов вдоль поймы р. Усердец, так и активными лесовосстановительными работами, включая залужение оврагов и создание лесополос [14].

Площадь жилой зоны, напротив, имеет выраженную негативную динамику. Пик застройки пришелся на 1956 г. – 5,06% (466,26 га). Однако удаленность от железнодорожной станции (35 км) и транспортная проблема спровоцировали отток населения в города, что к 2018 г. привело к сокращению доли жилой зоны до 3,91% (362,76 га). Наблюданная тенденция позволяет прогнозировать дальнейшее сокращение жилого фонда. Застройка прудов началась в 1980-е гг. [15, с. 36].

Таким образом, ключевыми трендами развития территории стали депопуляция и сокращение антропогенной нагрузки, выразившиеся в уменьшении жилой зоны и пахотных земель, а также масштабное естественное и искусственное лесовосстановление [13], приведшее к существенному изменению ландшафтной структуры.

Заключение

Проведенный ретроспективный анализ (1956–2018 гг.) выявил дивергентный характер трансформации функциональной структуры городских и сельских поселений. Ключевым трендом стало сокращение антропогенной нагрузки на аграрные ландшафты, что выразилось в закономерном уменьшении доли пашни и депопуляции сельских территорий, жилая зона которых устойчиво сокращалась на фоне роста городской застройки. Одновременно наблюдаются процессы экологизации и естественного восстановления ландшафта, подтверждаемые значительным увеличением лесопокрытых территорий (вследствие как целенаправленного лесоразведения, так и сукцессионных процессов) и площадей водных объектов. Стабильность площадей пастбищ, сенокосов и овражно-балочной сети указывает на относительную консервативность этих элементов ландшафтной структуры. Таким образом, основным вектором развития за 62 года стал переход от интенсивного аграрного использования территорий к их диверсификации с усилением средообразующих и социально-экономических функций.

Список литературы

1. Дроздова Е.А., Курганская К.А., Морозова Д.Е. Трансформация лесопокрытых территорий Белгородской области (на примере Яковлевского района) // Журналистика и география: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (г. Воронеж, 20–21 марта 2020 г.). Воронеж: Воронежский

- государственный университет; Квартал, 2020. С. 176–179. URL: https://www.rgo.ru/sites/default/files/programma_zhurnal-istika_i_geografiya.pdf (дата обращения: 14.09.2025).
2. Варламов А.А., Гальченко С.А. Формирование устойчивого сельскохозяйственного землепользования в современной России // Аграрная Россия. 2018. № 10. С. 45–49. DOI: 10.30906/1999-5636-2018-10-45-49.
 3. Антропов Д.В., Варламов А.А., Комаров С.И. Теория и методы зонирования территорий для целей управления земельными ресурсами. М.: ООО «Центр полиграфических услуг «РАДУГА», 2019. 228 с. ISBN 978-5-9215-0474-5.
 4. Чибиркина Е.А., Комаров С.И. Прогнозирование и планирование сельскохозяйственного землепользования Калужской области на современном этапе // Международный сельскохозяйственный журнал. 2023. № 4 (394). С. 322–325. DOI: 10.55186/25876740_2023_66_322.
 5. Sheina S.G., Fedorovskaya A.A. Methodology for improving the agricultural suitability of land for the sustainable development of a territory // Real Estate: Economics, Management. 2022. № 3. Р. 36–42. DOI: 10.22337/2073-8412-2022-3-36-42.
 6. Дубровская С.А., Ряхов Р.В. Ландшафтно-экологическое районирование города Оренбурга на основе геоморфометрических и эколого-хозяйственных особенностей территории // Геоинформатика. 2020. № 4. С. 63–70. DOI: 10.47148/1609-364x-2020-4-63-70.
 7. Chugunova N.V., Lisetskii F.N., Narozhnyaya A.G., Polyakova T.A., Morkovskaya D.N. Metropolization process in the rural settlement system of the Central chernozem region of Russia // Geography, Environment, Sustainability. 2024. Vol. 17. Is. 3. P. 98–108. DOI: 10.24057/2071-9388-2024-3168.
 8. Географический атлас Белгородской области: природа, общество, хозяйство / отв. ред. А.Г. Корнилов; ред.: А.Н. Петин, Ю.Г. Ченцов, В.И. Петина и др. Белгород: Константа, 2018. 200 с. ISBN 978-5-906952-92-9.
 9. Бударина В.А., Лисецкий Ф.Н., Косинова И.И., Курышев А.А. Особенности геоэкологического функционального зонирования отдельных сельских поселений и территории // Региональные геосистемы. 2024. Т. 48. № 3. С. 427–440. DOI: 10.52575/2712-7443-2024-48-3-427-440.
 10. Khoroshev A.V., Emelyanova L.G. Nature-Based Solutions in Spatial Planning: How to Adapt Land Use to Natural Heterogeneity in Agroforest Landscapes in Russia // Land. 2024. Vol. 13. Is. 4. P. 529. DOI: 10.3390/land13040529.
 11. Юдина Ю.В. Морфологический и морфометрический анализ ландшафтной структуры Белгородской области // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки. 2019. Т. 43. № 3. С. 307–318. DOI: 10.18413/2075-4671-2019-43-3-307-318.
 12. Петин А.Н., Корнилов А.Г., Назаренко Н.В., Гуляева Т.В., Жеребненко Ю.С., Федорченко Н.П. Функциональное зонирование земель населенных пунктов Белгородской области // Проблемы региональной экологии. 2009. № 5. С. 266–271. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=13088087> (дата обращения: 14.09.2025).
 13. Терехин Э.А. Особенности восстановления древесной растительности на постагрогенных землях юга Среднерусской возвышенности // Региональные геосистемы. 2024. Т. 48. № 3. С. 405–415. DOI: 10.52575/2712-7443-2024-48-3-405-415.
 14. Терехин Э.А. Оценка и автоматизированное картографирование современной лесистости овражно-балочных систем Белгородской области на основе спутниковых данных // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки. 2019. Т. 43. № 2. С. 173–181. DOI: 10.18413/2075-4671-2019-43-2-173-181.
 15. Киселев В.В., Бархатов А.С., Корнилов А.Г., Зеленская Е.Я. Оценка современного гидроэкологического состояния Белгородской области в условиях реализации программы интенсификации сельскохозяйственного производства: монография. Белгород: Белгородский государственный национальный исследовательский университет, 2024. 84 с. ISBN 978-5-9571-3679-8.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

УДК 528.942:528.88:551.35.054
 DOI 10.17513/use.38450

**ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ДИНАМИКИ
 КЛИФА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО
 ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ И ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ
 (НА ПРИМЕРЕ БЕРЕГОВОЙ ЗОНЫ ТАГАНРОГСКОГО ЗАЛИВА)**

Мисиров С.А. ORCID ID 0000-0002-1973-8748

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
 «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук»,
 Ростов-на-Дону, Российская Федерация, e-mail: sam.misirov@gmail.com*

Целью исследования является оценка динамики береговых клифов Таганрогского залива с использованием разновременных данных дистанционного зондирования Земли и пространственно-временного анализа в геоинформационных системах. В статье представлен комплексный подход к мониторингу изменений бровки береговых клифов, основанный на сравнительном анализе разновременных спутниковых снимков в геоинформационной среде. Для анализа использовались изображения, полученные с сенсоров «CORONA», «SPOT 1–5», «Sentinel -2», «Ресурс-П» за период с 1964 по 2022 год. На основе этих данных были оцифрованы линии бровок клифов и построены разрезы, перпендикулярные береговой линии, для расчета скоростей динамики береговых уступов. Пространственно-временной анализ спутниковых данных за период с 1964 по 2022 год позволил определить линейные среднемноголетние скорости размыва берегов. Установлено, что для 57% береговой линии характерна слабая интенсивность размыва, для 13% – средняя, и для 23% – сильная. Помимо линейных скоростей, на основе детальных схем геологического строения, цифровой модели рельефа «Forest And Buildings removed Copernicus DEM» и собственных полевых данных о морфометрии и современном состоянии клифов была проведена оценка объемных скоростей размыва ($\text{м}^3/\text{год}$).

Ключевые слова: береговая зона, откос береговой, мониторинг, ДЗЗ, ГИС, Таганрогский залив

**ASSESSMENT OF SPATIAL AND TEMPORAL DYNAMICS OF SEA CLIFFS
 BASED ON REMOTE SENSING DATA AND GEOINFORMATION SYSTEMS
 (ON THE EXAMPLE OF THE COASTAL ZONE OF THE TAGANROG BAY)**

Misirov S.A. ORCID ID 0000-0002-1973-8748

*Federal State Budget Institution of Science «Federal Research Centre
 the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences»,
 Rostov-on-Don, Russian Federation, e-mail: sam.misirov@gmail.com*

The purpose of this work was to evaluate the dynamics of sea cliffs in the coastal zone of the Taganrog Bay, based on multi-time data from remote sensing of the Earth from space and using spatial and spatio-temporal analysis in geoinformation systems. The article proposes a comprehensive approach to monitoring spatiotemporal changes in the edge of sea cliffs, based on a comparative analysis of multi-time satellite images in a geoinformation environment. Images obtained from CORONA, SPOT 1–5, Sentinel -2, Resource-P sensors for the period from 1964 to 2022 were used for analysis. Based on these data, the lines of cliff edges were digitized and perpendicular to the coastline, the cuts were constructed to calculate the dynamics velocities of the sea cliff. The spatio-temporal analysis of satellite data for the period from 1964 to 2022 allowed to determine the linear average annual rates of coastal erosion. It was found that 57% of the coastline is characterized by a low intensity of erosion, for 13% – an average, and for 23% has a high rate. In addition to linear rates, based on detailed geological structures, the «Forest And Buildings removed Copernicus DEM» digital elevation model, and our own field data on the morphometry and current state of the cliffs, we estimated the volumetric erosion rates (m^3/year).

Keywords: coastal zone, scarp, monitoring, remote sensing, geoinformation system, Taganrog Bay

Введение

Таганрогский залив расположен в северо-восточной части Азовского моря и вытянут на 120 км в субширотном направлении, ширина его составляет 20-40 км, что делает его крупнейшим заливом моря. Побережье Таганрогского залива характеризуется высокой степенью урбанизации и промышленной концентрации. Здесь расположены такие крупные портовые города, как Мариуполь, Таганрог и Ейск, а также многочис-

ленные населенные пункты. Промышленная деятельность и высокая плотность населения создают значительную антропогенную нагрузку на прибрежные экосистемы.

Береговая линия залива сформирована легкоразмываемыми лёссовидными суглинками, что делает ее подверженной эрозионным процессам. Отвесные абразионные уступы, характерные для данного региона, находятся в зоне повышенного риска разрушения под воздействием неблагоприятных

природных факторов, таких как штормовая активность, а также антропогенных факторов, включая хозяйственную деятельность человека.

Для береговой зоны Азовского моря, и в особенности Таганрогского залива, характерно развитие опасных экзогенных геологических процессов (ОЭГП): абразии, оползней, формирование оврагов и балок. Наиболее масштабными опасными процессами следует признать абразионные и абразионно-оползневые разрушения береговых обрывов; эти процессы охватывают 80% морского побережья Азовского моря [1]. Кроме природных процессов, происходящих в береговой зоне Таганрогского залива, в последнее время усиливается освоение береговой зоны – строительство автодорог, портовой инфраструктуры, развитие объектов рекреации, сельскохозяйственная деятельность, урбанизация, что в свою очередь дополнительно создает нагрузку на устойчивость склонов. Все эти факторы в целом обуславливают необходимость изучения ОЭГП для минимизации возможного ущерба.

Проявление опасных экзогенных геологических процессов в пределах побережья Таганрогского залива нередко приводит к разрушению объектов капитального строительства, промышленной инфраструктуры и потере ценных сельскохозяйственных земель, а также снижает рекреационную привлекательность побережья, все эти факторы в целом обуславливают необходимость постоянного мониторинга и изучения ОЭГП в пределах исследуемого региона для минимизации возможного ущерба [1-3].

Стоит отметить, что систематическое изучение береговой зоны Азовского моря началось с середины XX века и продолжается в настоящее время [4-6]. Эти исследования основаны на инструментальном методе измерений [7, с. 121-122; 8; 9], который позволяет с высокой точностью определить размыв берегов и провести оценку изменений в численном выражении. Но такой подход не лишен недостатков, главным из которых является точечный характер наблюдений, зачастую он не отражает изменений бровки клифа на всем протяжении береговой линии. Вместе с тем протяженность зоны мониторинга в пределах берегов Азовского моря составляет более 1000 км [10, с. 270-271], а применительно к Таганрогскому заливу более 300 км. Исходя из этого значительные участки берега между опорными точками не всегда могут быть полностью охвачены процессом мониторинга.

Анализ существующей практики изучения динамики береговой зоны морей и водохранилищ показывает, что наилучший результат мониторинга может быть достигнут при комбинации классических инструментальных методов, применения данных ДЗЗ, картографических и фотограмметрических методов, а также современных ГИС-технологий. Из подобных работ можно выделить исследования побережий: Индии [11]; Италии [12]; северных морей России [13].

Цель исследования заключалась в оценке пространственно-временной динамики клифа в береговой зоне Таганрогского залива на основе данных дистанционного зондирования Земли из космоса и пространственно-временного анализа в геоинформационной среде.

Материалы и методы исследования

В большинстве работ, проведённых выше, объектом для оценки динамики выступает, как правило, именно береговая линия, которая определяется как:

- среднемноголетнее положение уреза воды;

- граница, по которой водная поверхность пересекается с сушей, или некоторое среднее положение между морем и сушей в данный период [14]. Исходя из этого оценка направлена на получение значений скорости размыва или аккумуляции в зоне пляжа.

В настоящей работе для оценки динамики скоростей абразии использован подход, при котором объектом исследования выступает линия бровки берегового уступа, что позволяет, зная положение этой бровки в различные периоды времени, рассчитать скорости отступания клифа в абразионной береговой зоне.

На первом этапе для анализа динамики берегов были отобраны данные дистанционного зондирования Земли, представленные в таблице. Далее все снимки проходили процедуру предварительной обработки и пространственной привязки.

В качестве программной платформы была использована полнофункциональная геоинформационная система (ГИС) ArcGIS v. 10., с инструментом Digital Shoreline Analysis System (DSAS) [15], который является надстройкой и предоставляется на бесплатной основе. DSAS позволяет пользователю вычислить статистику скорости изменений из нескольких исторических позиций береговой линии на основе построенных разрезов (трансектов) по нормали к берегу с заданным шагом.

Данные дистанционного зондирования Земли, использованные для построения
серии разновременных линий бровки берегового уступа

№	Дата снимка	Космический аппарат	Разрешение, м	Побережье
1	14.07.1964	CORONA J-1 (KH-4A)	2,5	северное
2	01.07.1975	Hexagon (KH-9-10)	4	то же
3	12.08.1988	Spot 1	10	<
4	31.05.1988	Spot 1	10	<
5	21.08.2006	Spot 5	5	<
6	01.05.2017	Ресурс-П №2	0,6	<
7	03.10.2017	Ресурс-П №2	0,6	<
8	05.10.2017	Ресурс-П №1	0,6	<
9	19.01.2020	Sentinel-2	10	<
10	12.07.2022	Sentinel-2	10	<
11	19.09.1971	Corona (KH-4B)	2	южное
12	01.07.1975	Hexagon (KH-9-10)	4	то же
13	12.08.1988	Spot 1	10	<
14	31.05.1988	Spot 1	10	<
15	21.08.2006	Spot 5	5	<
16	26.07.2016	Ресурс-П №2	0,6	<
17	19.01.2020	Sentinel-2	10	<
18	12.07.2022	Sentinel-2	10	<

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

Следующим шагом была оцифровка бровки клифа, на масштабах 1:500, 1:1500, 1:2000. Полученные береговые линии использовались для расчета скоростей абразии для северного побережья за временной период с 1964 по 2022 г., а для южного побережья с 1971 по 2022 г. Контроль качества полученных линий бровки (E_r) производился путем расчета неопределенностей (ошибок оцифровки/картографирования), как сумма среднеквадратических погрешностей всех источников ошибок.

В оценке учитывались три составляющие, которые могут вносить погрешности:

1. E_r [м] – разрешение данных ДЗЗ из космоса (табл.);

2. E_g [м] – неопределенность географической привязки, которая была рассчитана как среднее значение среднеквадратичных ошибок всех точек привязки (общее значение RMSE в ArcGIS);

3. E_c [м] – точность оцифровки линии при помощи стандартных инструментов ГИС.

Для масштаба 1:2000 и стандартного пера 0,35 мм соответствует линия шириной 0,7 м на местности. Для масштаба 1:5000 ширина равна 1,75 м [15; 16].

Для изучаемого периода с 1964 по 2022 г. погрешность линейной скорости движения бровки составила ± 0.3 м/год.

Результаты исследования и их обсуждение

В результате пространственно-временного анализа данных ДЗЗ за период с 1964 по 2022 г. были получены линейные средненомоголетние скорости размыва берегов (рис. 1) и установлено, что 57% береговой линии соответствуют слабой (<1 м/год) интенсивности размыва берегов, 13% – средней, 23% – сильной.

Наибольшие темпы размыва характерны для участков х. Весело-Вознесенка (средняя скорость по участку составила 1,87 м/год) и участка между ст. Должанской и с. Воронцовка (2,4 м/год). Основным фактором интенсивного размыва на этих участках является геологическое строение. Берег на этих участках сложен легкоразмываемыми суглинистыми отложениями.

Вторым фактором, влияющим на интенсивное разрушение этих участков, является отсутствие так называемой природной защиты, т.е. наличие широкого пляжа в основании. Как правило, этим участкам свойственны узкие (2-10 м), прислоненные к клифу, маломощные пляжи, как в случае с х. Весело-Вознесенкой, или вовсе его отсутствие, как на участке от х. Воронцовка до ст. Должанской.

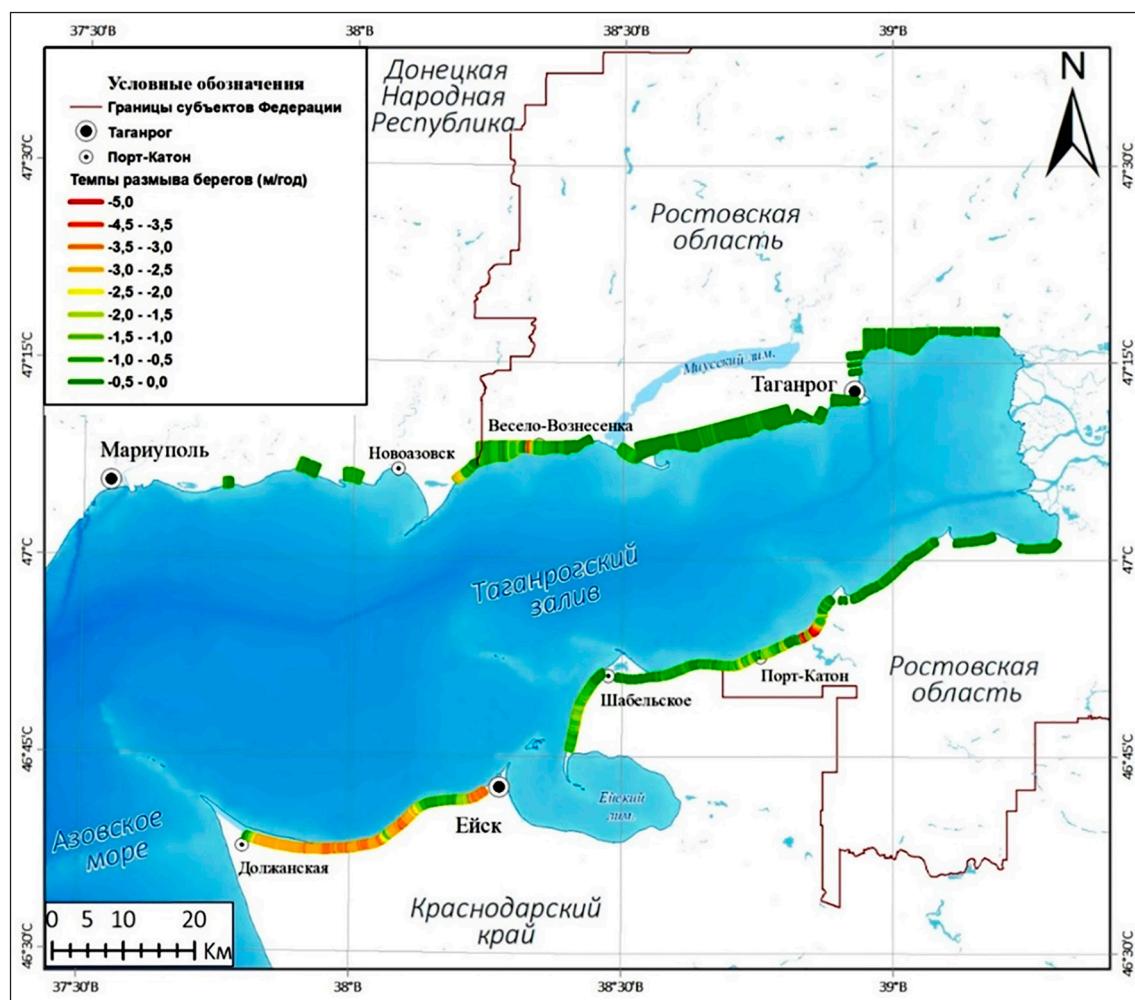


Рис. 1. Среднемноголетние темпы отступания берегов за 1964–2022 гг.
Примечание: составлено автором на основе полученных данных в ходе исследования

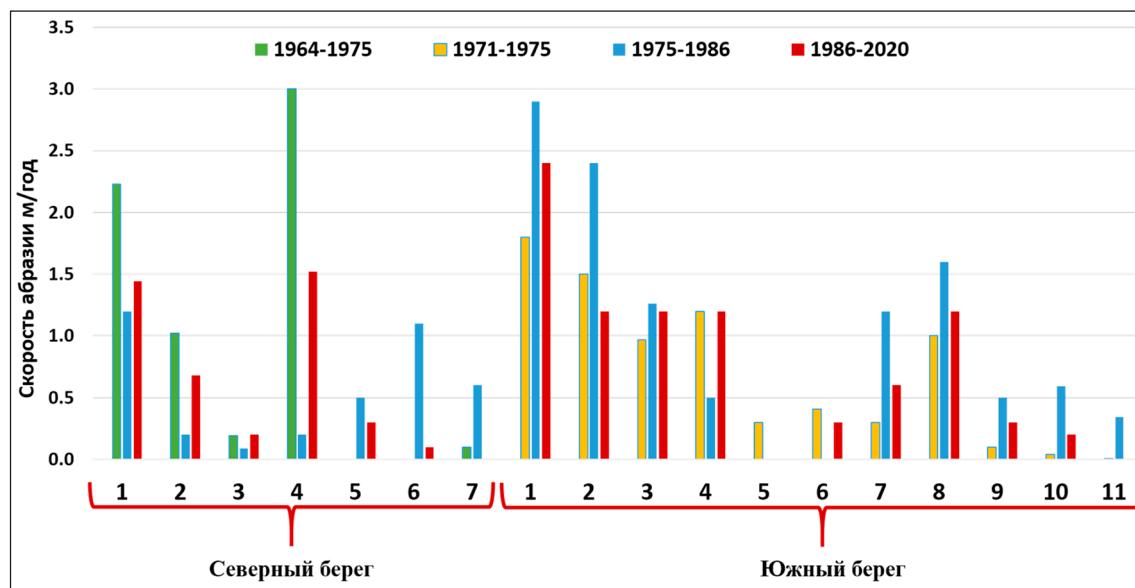


Рис. 2. Линейные скорости отступания берегов по участкам, рассчитанные для различных периодов
Примечание: составлено автором на основе полученных данных в ходе исследования

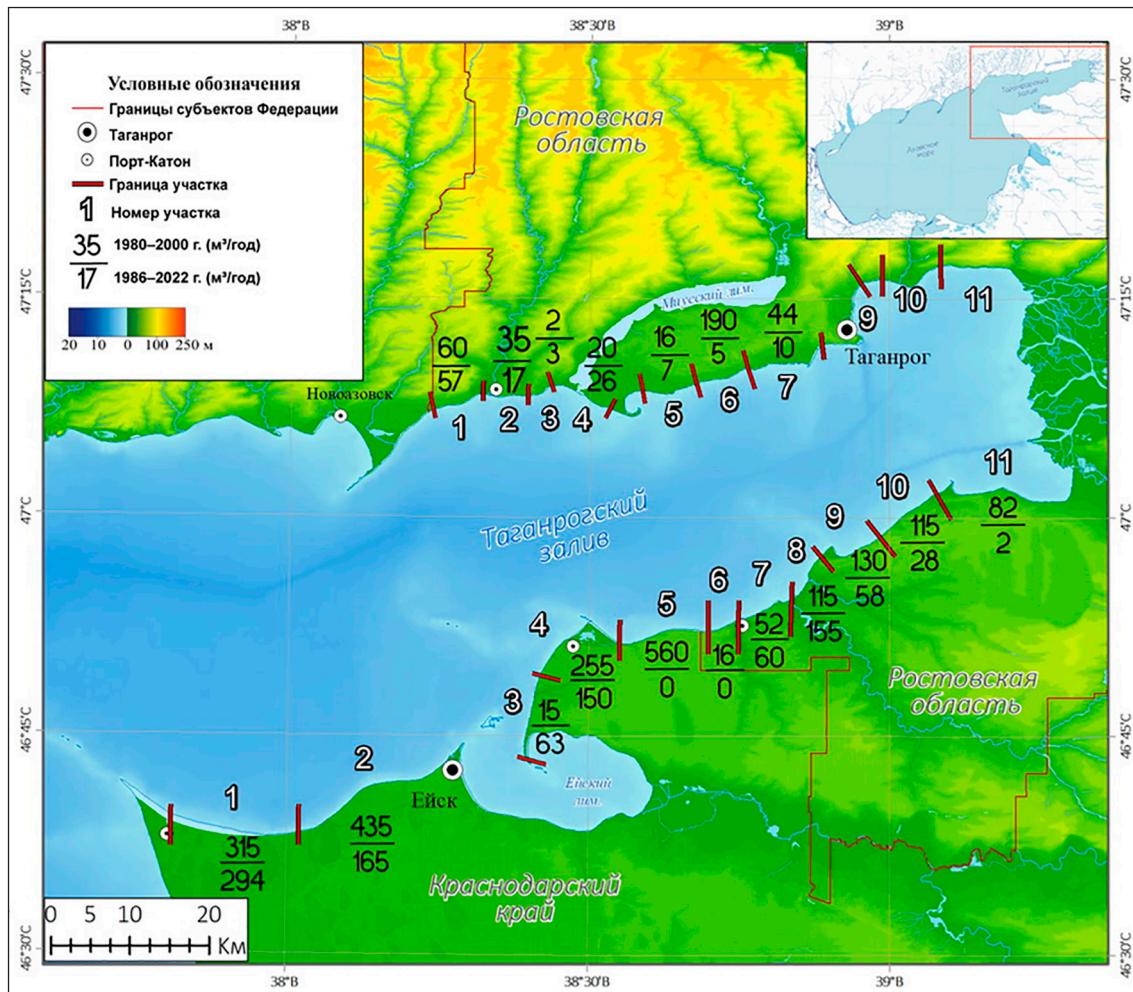


Рис. 3. Схема абразионных участков Таганрогского залива с оценками объемов терригенного материала, поступающего в прибрежную зону ($\text{м}^3/\text{год}$).
Северный берег: 1 – Весело-Вознесенский; 2 – Приазовский (Боковский); 3 – Рожковский; 4 – Беглицкий; 6 – Новолакедемоновский; 7 – Русскослободской.
Южный берег: 1 – Кругловский; 2 – Павло-Очаковский; 3 – Семибалковский; 4 – Чумбурский; 5 – Маргаритовский; 6 – Порт-Катоновский; 7 – Молчановский; 8 – Шабельский; 9 – Глафировский; 10 – Воронцовский; 11 – Должанский)
Примечание: составлено автором на основе полученных данных в ходе исследования.

Далее для каждого участка береговой зоны, согласно районированию [8, с. 8; 11, с. 270], были рассчитаны линейные скорости по трем периодам: с 1964 по 1975 г., с 1975 по 1986 г. и с 1986 по 2020 г. (рис. 2).

На следующем этапе исследования, с применением детальных схем геологического строения [9; 10, с. 92-115], данных о морфометрии на основе цифровой модели рельефа (ЦМР) – «FABDEM» (Forest And Buildings Removed Copernicus DEM) [17], собственных данных о морфометрии склонов и их состоянии, полученных в ходе полевых исследований 2020-2023 гг. [18], линейные скорости абразии были пересчитаны в объемные показатели отступания морских берегов ($\text{м}^3/\text{год}$).

Полученные результаты подверглись сравнительной оценке с данными предыдущих исследований (рис. 3).

Согласно сделанным ранее оценкам [9], за период с 1980 по 2000 г. наибольшее количество материала поступало от размыва участков 1-4 на северном побережье и 1-4 на южном побережье, это согласуется и с литературными данными. На основе проведенного анализа можно сделать вывод о том, что число участков, наиболее интенсивно отступающих, сохраняется. Однако ежегодное поступление материала береговой абразии с южного берега Таганрогского залива в 1990-2020 гг. примерно в 2 раза меньше по сравнению с ранее сде-

ланными оценками. Это обусловлено тем, что темпы размыва берегов в современный период плавно понижаются с продвижением к вершине Таганрогского залива и практически затухают на 10-11 участке. Это же подтверждается натурными наблюдениями на мониторинговых участках, зачастую клифы здесь невысокие и имеют высоту 8-12 м, часть клифов задернована вместе с тыловой частью пляжа.

Ежегодное поступление терригенного материала с северного берега залива существенно не изменилось, т. к. на основных участках скорость размыва сохраняется и для современного периода.

Участки 10-11 характеризуются оползневым типом берега, здесь сосредоточены сложные по своей структуре многоступенчатые оползни, ступени сильно задернованы, из-за чего дешифрировать однозначно бровку клифа не представляется возможным.

В целом, анализ показал, что ежегодное поступление терригенного материала при размыве берегов с южного берега Таганрогского залива в 1990-2020 гг. примерно в 2 раза меньше по сравнению с ранее сделанными оценками. Это обусловлено тем, что темпы размыва берегов в современный период плавно понижаются с продвижением к вершине Таганрогского залива и практически затухают на 10-11 участке.

Ежегодное поступление терригенного материала с северного берега залива существенно не изменилось.

Заключение

Проведенные исследования с использованием данных дистанционного зондирования Земли и ГИС позволили провести мониторинг отступания бровки береговых клифов за длительный период. Установлено, что 57% береговой линии соответствуют слабой (<1 м/год) интенсивности размыва берегов, средней – 13%, сильной – 23%. Наибольшие темпы размыва характерны для участков х. Весело-Вознесенка (Неклиновский район Ростовской области) (средняя скорость по участку составила 1,87 м/год) и участка у ст. Должанской (Ейский район Краснодарского края) (2,4 м/год). В целом охарактеризовать общее распределение скоростей можно так: 57% береговой линии соответствуют слабой (<1 м/год) интенсивности размыва берегов, средней – 13%, сильной – 23%.

Полученные результаты подчеркивают необходимость дальнейшего мониторинга динамики и развития береговой зоны Таганрогского залива в условиях продолжающих-

ся климатических изменений и возрастающего антропогенного давления. Проведенные исследования могут быть полезны при пространственном планировании, разработке рекомендаций и рациональном управлении прибрежной зоной Таганрогского залива. Кроме того, результаты могут использоваться при проектировании и строительстве гидротехнических сооружений и берегозащитных мероприятий. На основании концепции развития Приазовья до 2040 г. и ряда постановлений о развитии прибрежных регионов Азовского моря (Краснодарский край, Ростовская область, Донецкая Народная Республика и т.д.) до 2030-2040 гг. результаты могут применяться при рекреационном освоении исследуемой прибрежной зоны.

Список литературы

1. Матищов Г.Г., Ивлиева О.В., Беспалова Л.А., Кропянко Л.В. Эколого-географический анализ морского побережья Ростовской области // Доклады Академии наук. 2015. Т. 460. № 1. С. 88–92. DOI: 10.7868/S0869565215010181.
2. Мисиров С.А., Магаева А. А., Хорошев О. А., Кулгин В.В. Прогноз ущерба социально-экономическим объектам от разрушения берегов Таганрогского залива в пределах Ростовской области // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2024. Т. 29, № 1. С. 127–138. DOI: 10.33764/2411-1759-2024-29-1-127-138.
3. Архипова О.Е. Мисиров С.А. Оценка рекреационной привлекательности Восточного Приазовья // Геология и геофизика Юга России. 2025. Т. 15, № 1. С. 166–179. DOI: 10.46698/VNC.2025.89.22.014.
4. Аксенов А.А. Морфология и динамика северного берега Азовского моря // Труды ГОИН. 1955. Т. 41, Вып. 29. С. 107–143. URL: <http://elib.vniro.ru/lib/document/DB7/A35A1B15-44A4-4976-AE8B-B3A5A77C4055/> (дата обращения: 15.09.2025).
5. Аксенов А.А. Некоторые особенности абразии берегов Азовского моря // Труды ГОИН. 1957. Т. 43, Вып. 31. С. 122–145. URL: <http://elib.vniro.ru/lib/document/DB7/A898EAD8-FFB1-4420-9DB3-6CEF4DBCFC20/> (дата обращения: 15.09.2025).
6. Мамыкина В.А. Интенсивность современных процессов в береговой зоне Азовского моря // Известия ВГО. 1978. Т. 110. Вып. 4. С. 351–355. URL: <http://elib.vniro.ru/lib/document/DB7/8FB3E2CD-ECD3-44C3-8535-F90A0D0A5E75/> (дата обращения: 15.09.2025).
7. Мамыкина В.А., Хрусталев Ю.П. Береговая зона Азовского моря. Ростов н/Д: Изд-во РГУ, 1980. 176 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001034445> (дата обращения: 15.09.2025).
8. Артиохин Ю.В. Волновое разрушение обвальных берегов Азовского моря // Геоморфология. 1982. № 4. С. 51–58. URL: <https://geomorphology.igras.ru/jour/article/view/2370> (дата обращения: 15.09.2025).
9. Ивлиева О.В., Бердников С.В. Современные скорости разрушения берегов российского побережья Азовского моря // Геоморфология. 2005. № 4. С. 74–83. DOI: 10.15356/0435-4281-2005-4-74-83.
10. Беспалова Л.А., Ивлиева О.В., Цыганкова А.Е. Берега Азовского моря: 100 лет наблюдений / Науч. ред. акад. РАН Матищов Г.Г.; отв. ред. Бердников С.В. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2023. 384 с. URL: https://www.ssc-ras.ru/editions/berega_azovskogo_morja_100_let_nablyudenii_mono-grafija_la_besp/ (дата обращения: 15.09.2025). ISBN 978-5-4358-0255-9.

11. Jayanthi M., Thirumurthy S., Samynathan M., Duraisamy M., Muralidhar M., Ashokkumar J., Vijayan K.K. Shoreline change and potential sea level rise impacts in a climate hazardous location in southeast coast of India // Environmental Monitoring and Assessment. 2017. Vol. 190, No. 1. P. 51. DOI: 10.1007/s10661-017-6426-0.
12. Zachopoulos K., Kokkos N., Dal Barco MK., Furlan E., Pham HV., Torresan S., Critto A. and Sylaios G. A harmonized framework to assess coastal erosion blending copernicus marine data products and satellite imagery along Greek and Italian shorelines // Front. Environ. Sci. 2025. № 13. P. 1602740. DOI: 10.3389/fenvs.2025.1602740.
13. Novikova A.V., Vergun A.P., Zelenin E.A., Baranskaya A.V., Ogorodov S.A. Determining dynamics of the Kara sea coasts using remote sensing and UAV data: A case study // Russian Journal of Earth Sciences. 2021. Vol. 21. № 3. P. ES3004. DOI: 10.2205/2020ES000743.
14. Гогоберидзе Г.Г., Жамойда В.А., Нестерова Е.Н., Рябчук Д.В., Спиридовон М.А. Глоссарий по Кадастру береговой (прибрежной) зоны. СПб.: Изд. РГГМУ, 2008. 95 с. ISBN 978-5-86813-214-8.
15. Himmelstoss E.A., Henderson R.E., Kratzmann M.G., Farris A.S. Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.0 user guide: U.S. Geological Survey Open-File Report 2018-1179. 2018. 110 p. DOI: 10.3133/ofr20181179.
16. Basset M., Anthony E.J., Bouchette F. Multi-decadal variations in delta shorelines and their relationship to river sediment supply: An assessment and review // Earth-Science Reviews. 2019. Vol. 193. P. 199-219. DOI: 10.1016/j.earscirev.2019.04.018.
17. Uhe P., Hawker L., Paulo L., Sosa J., Sampson C., Neal J. FABDEM – A 30m global map of elevation with forests and buildings removed // EGU General Assembly. 2022. Vienna, Austria, 23–27 May 2022. EGU22-8994. DOI: 10.5194/egusphere-egu22-8994.
18. Мисиров С.А. Современные морфометрические данные береговой зоны Таганрогского залива в пределах Ростовской области (по материалам экспедиционных исследований ЮНЦ РАН) // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Геоинформационные технологии и космический мониторинг. 2023. Т. 2. № 8. С. 56–62. DOI: 10.23885/2500-123X-2023-2-8-56-62.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (Соглашение № 075-15-2024-528 от 24.04.2024 на реализацию КНП по приоритетным направлениям научно-технологического развития). Анализ объемных скоростей отступания береговых клифов Таганрогского залива проведен в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН, № гр. проекта 125011200143-4.

Financing: This work was supported by the Russian Ministry of Education and Science (Agreement No. 075-15-2024-528 dated April 24, 2024, for the implementation of the KNP in priority areas of scientific and technological development). The analysis of the volumetric rates of coastal cliff retreat in Taganrog Bay was conducted as part of the State Project of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, project no. 125011200143-4.

УДК 911.3:314.15
 DOI 10.17513/use.38451

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ СУММАРНОГО КОЭФФИЦИЕНТА РОЖДАЕМОСТИ В ЦЕНТРАЛЬНОМ ФЕДЕРАЛЬНОМ ОКРУГЕ

^{1,2}Яковенко Н.В., ^{1,2}Гурченко В.И.

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», Саранск, Российской Федерации;

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Российской Федерации, e-mail: n.v.yakovenko71@gmail.com

Исследование посвящено анализу пространственных различий в уровне рождаемости на территории Центрального федерального округа. Актуальность работы обусловлена значительной дифференциацией демографических процессов в регионах округа и необходимостью выявления ключевых факторов, влияющих на репродуктивное поведение населения. Целью исследования является выявление современных тенденций и детерминант пространственной дифференциации рождаемости в субъектах Центрального федерального округа. В работе использованы статистические методы анализа данных, включая сравнительно-географический анализ и корреляционные исследования, на основе официальных статистических данных за период с 2010 по 2023 год. Установлено, что уровень рождаемости в округе характеризуется значительной межрегиональной вариативностью. Выявлена устойчивая закономерность распределения показателей рождаемости между городскими и сельскими территориями, проявляющаяся в систематическом снижении интенсивности деторождения по мере увеличения уровня урбанизации. Особое внимание уделено анализу различий в репродуктивном поведении населения различных типов муниципальных образований. Проведенное исследование подтвердило гипотезу о значительном влиянии типа поселения на параметры рождаемости. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости разработки дифференцированных подходов к демографической политике с учетом выявленных пространственных закономерностей и специфики различных категорий муниципальных образований в целях обеспечения демографической устойчивости регионов.

Ключевые слова: рождаемость, пространственная дифференциация, Центральный федеральный округ

SPATIAL VARIATION OF THE TOTAL FERTILITY RATE IN THE CENTRAL FEDERAL DISTRICT

^{1,2}Yakovenko N.V., ^{1,2}Gurchenko V.I.

¹Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
 «National Research Ogarev Mordovia State University», Saransk, Russian Federation;

²Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
 «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov»,
 Voronezh, Russian Federation, e-mail: n.v.yakovenko71@gmail.com

This study is dedicated to analyzing spatial variations in fertility levels across the Central Federal District of Russia. The relevance of the work is determined by significant disparities in demographic processes among the regions of the district and the need to identify key factors influencing the reproductive behavior of the population. The aim of the research is to identify current trends and determinants of the spatial differentiation of fertility within the constituent entities of the Central Federal District. The study employs statistical methods of data analysis, including comparative geographical analysis and correlation research, based on official statistical data for the period from 2010 to 2023. The study found that the fertility rate in the district is characterized by significant interregional variability. A stable pattern in the distribution of fertility indicators between urban and rural areas was revealed, manifesting as a systematic decline in the intensity of childbearing as the level of urbanization increases. Particular attention is paid to the analysis of differences in the reproductive behavior of the population in various types of municipal units. The conducted research confirms the hypothesis about the significant influence of the type of settlement on fertility parameters. The obtained results indicate the necessity of developing differentiated approaches to demographic policy, taking into account the identified spatial patterns and the specificities of various categories of municipal units, to ensure the demographic sustainability of the regions.

Keywords: fertility, spatial differentiation, total fertility rate, Central Federal District, reproductive behavior, urbanization

Введение

Актуальность исследования пространственных различий в суммарном коэффициенте рождаемости (СКР) обусловлена продолжающимся в России периодом де-

популяции и сохраняющимся сокращением рождаемости. В условиях общемирового тренда на снижение фертильности [1; 2] и роста уровня урбанизации [3; 4], которые находятся в обратной зависимости, особен-

но остро стоит задача поиска механизмов исправления негативных демографических трендов. Выявление устойчивых пространственных закономерностей в распределении рождаемости на уровне регионов и муниципальных образований позволяет не только глубже понять детерминанты этого процесса, но и разработать адресные меры демографической политики, учитывающие специфику отдельных территорий. Степень научной разработанности проблемы характеризуется наличием значительного числа как зарубежных, так и российских исследований. В международных работах отмечается необычная тенденция повторного роста рождаемости в наиболее развитых странах Европы с высоким уровнем жизни. Такие авторы, как Sobotka T., Matysiak A., Brzozowska Z. [5; 6], критически исследуют сам показатель СКР, указывая на то, что он может давать дезориентирующие сигналы политикам из-за тайминговых сдвигов в календаре рождений. Исследования, подобные работам G. Vampinas, G. Mavropoulos [7], анализируют связь низкой рождаемости с социально-экономическим развитием [8] и гендерным равенством [9]. Отечественные исследования активно развиваются данное направление. Ученые фиксируют, что рождаемость в сельской местности практически повсеместно превосходит городскую, за исключением территорий с активным миграционным притоком [10; 11]. Важный вклад вносят работы, посвященные анализу рождаемости в реальных, а не условных поколениях [12; 13], что позволяет устраниТЬ конъюнктурную составляющую и выявить долговременные тренды. Исследования на муниципальном уровне (мезоуровне), хотя и проводятся реже, крайне востребованы, так как раскрывают закономерности, не заметные в региональном разрезе [14-16].

Внутри Центрального федерального округа (ЦФО) сохраняется резкая пространственная поляризация суммарного коэффициента рождаемости (СКР). Несмотря на относительную социально-экономическую однородность, демографическая ситуация в округе характеризуется глубоким разрывом между отдельными регионами. Это свидетельствует о том, что средние показатели по округу маскируют принципиально разные демографические реальности, а универсальные меры демографической политики не учитывают специфику территорий.

Цель исследования – комплексный анализ пространственной дифференциации суммарного коэффициента рождаемости

в субъектах Центрального федерального округа за период с 2010 по 2023 год, выявление устойчивых тенденций и ключевых детерминант, определяющих региональные особенности репродуктивного поведения населения.

Материалы и методы исследования

Для изучения пространственной дифференциации рождаемости в Центральном федеральном округе использовались данные официальной статистики за 2010-2023 годы. Основным показателем анализа выступил суммарный коэффициент рождаемости (СКР).

Методология исследования включала сравнительный анализ значений СКР между субъектами ЦФО с применением статистических методов. Для выявления территориальных закономерностей использовалось ранжирование регионов по уровню рождаемости и анализ динамики показателей. Для обеспечения достоверности результатов применялись методы вариационной статистики, включая расчет средних значений и мер изменчивости. Визуализация данных осуществлялась посредством табличного и графического представления информации. Обработка данных проводилась с использованием современных программных средств статистического анализа.

Результаты исследования и их обсуждение

Ключевым параметром, позволяющим оценить вклад Центрального федерального округа (ЦФО) в демографическое будущее России, является суммарный коэффициент рождаемости (СКР). Анализ динамики и текущего уровня СКР в ЦФО в сравнении с общероссийскими показателями не только раскрывает глубину регионального неравенства, но и выявляет специфические социально-экономические и культурные детерминанты рождаемости, характерные для наиболее урбанизированных и экономически развитых территорий страны. Таким образом, исследование места ЦФО в общероссийском демографическом контексте через призму СКР представляется необходимым этапом для понимания общих траекторий демографического развития. Для понимания современных демографических вызовов России принципиально важным является анализ долгосрочной динамики рождаемости. Рисунок 1, отображающий тренд суммарного коэффициента рождаемости (СКР), демонстрирует, что, несмотря на позитивную динамику предыдущих лет, значение

показателя в последнем наблюдаемом периоде остается ниже уровня, необходимого для простого воспроизводства населения (2,1). График наглядно иллюстрирует, в какие периоды меры государственной поддержки были наиболее эффективны, а также выявляет устойчивую циклическую или структурную компоненту в изменениях СКР.

Анализ динамики рождаемости в ЦФО выявил устойчивую тенденцию к снижению после кратковременного роста в 2012-2015 годах. К 2023 году СКР в округе составил 1,25, что ниже среднероссийского показателя (1,41) и значительно ниже уровня, необходимого для простого воспроизводства населения (2,15).

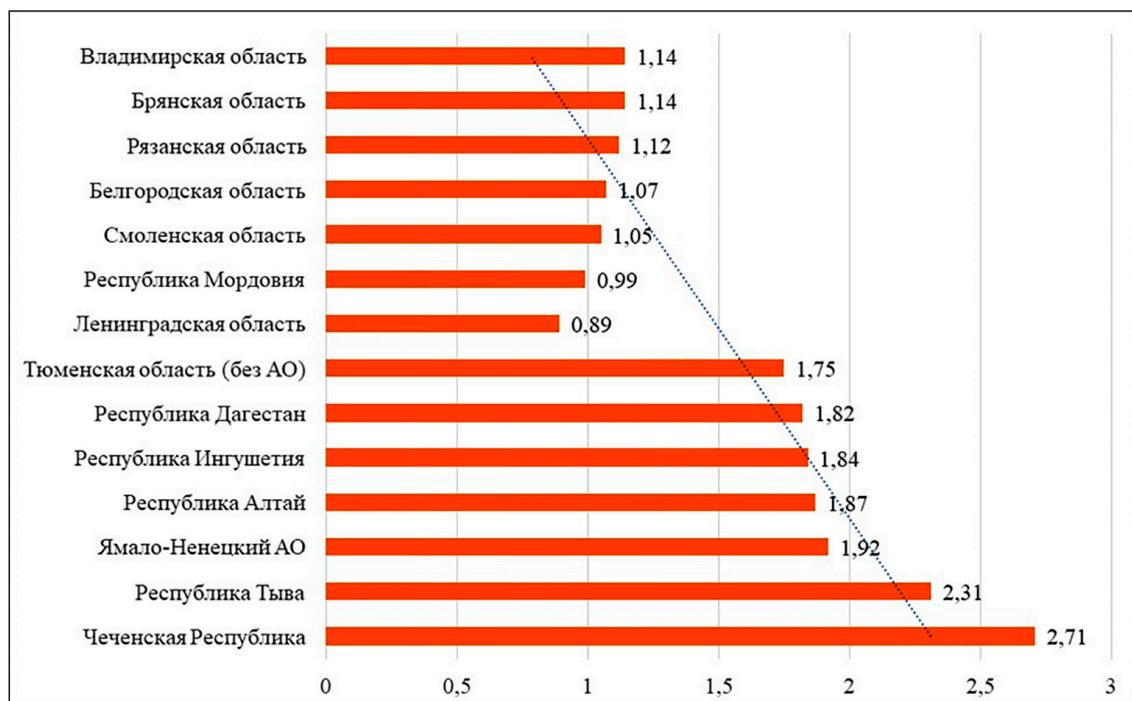


Рис. 1. Суммарный коэффициент рождаемости (СКР) в России
Примечание: составлено авторами на основе данных Росстата

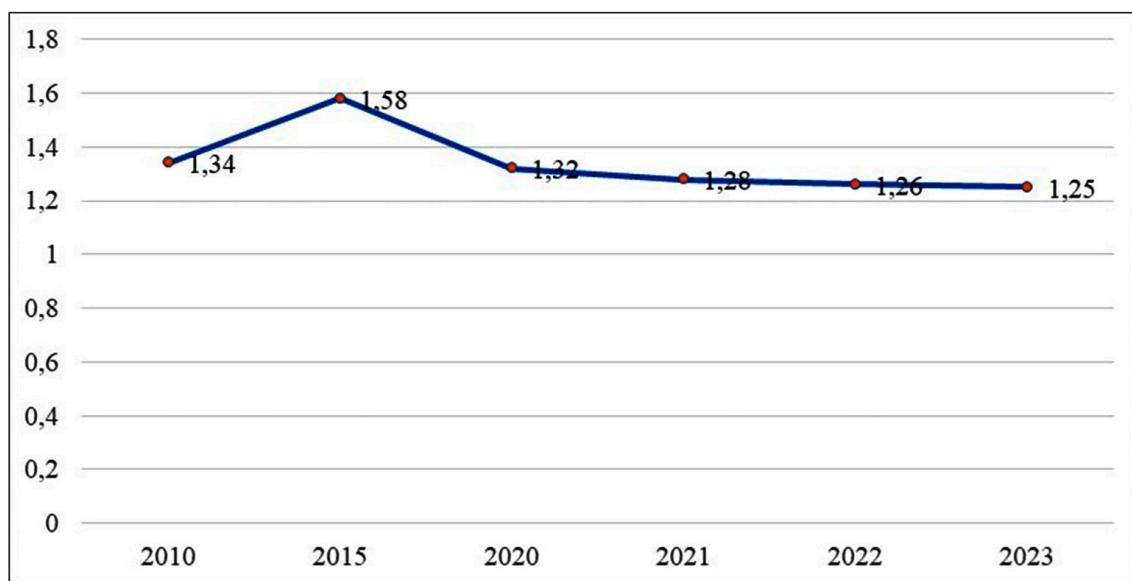


Рис. 2. Динамика суммарного коэффициента рождаемости в субъектах ЦФО
Примечание: составлено авторами на основе данных Росстата

Выявленная устойчивая тенденция к снижению является усредненным результатом разнонаправленных или разноинтенсивных процессов в регионах округа. Рисунок 2, отображающий динамику СКР в субъектах ЦФО, наглядно демонстрирует эту внутреннюю неоднородность. Сравнительный анализ позволяет определить, является ли низкий средний показатель по округу следствием повсеместного снижения или же результатом крайне низких значений в нескольких ключевых субъектах, таких как Москва и Московская область.

Проведенный анализ пространственной дифференциации суммарного коэффициента рождаемости (СКР) в субъектах Центрального федерального округа позволил выявить значительные межрегиональные различия. В таблице 1 представлена группировка регионов с экстремальными значениями изучаемого показателя. Анализ экстремальных значений демонстрирует существенную пространственную дифференциацию репродуктивного поведения в ЦФО. Максимальные показатели СКР зафиксированы в Костромской области (1,55), что на 0,52 пункта превышает минимальное значение, наблюданное в Смоленской области (1,03).

Столичный регион (г. Москва и Московская область) характеризуется относитель-

но высокими для ЦФО значениями СКР (1,42 и 1,35 соответственно), что, вероятно, связано с более молодой возрастной структурой населения, обусловленной миграционными процессами. Регионы с минимальными показателями СКР (менее 1,20) формируют компактный ареал в юго-западной и центральной частях округа, что свидетельствует о наличии выраженных пространственных закономерностей в распределении демографических показателей. Выявленный разброс значений подтверждает гипотезу о значительной региональной вариативности параметров рождаемости в пределах ЦФО. Полученные результаты подтверждают гипотезу о значительной региональной вариативности параметров рождаемости в пределах ЦФО и свидетельствуют о необходимости разработки дифференцированных подходов к демографической политике с учетом выявленных пространственных закономерностей. Выявленная на основе данных таблицы 1 значительная межрегиональная дифференциация рождаемости в ЦФО находит свое логическое объяснение при анализе внутрирегиональных различий. Уровень урбанизации и тип поселения являются ключевыми факторами, определяющими репродуктивное поведение населения.

Таблица 1

Регионы ЦФО с максимальными и минимальными значениями СКР в 2023 году

Регионы с максимальным СКР	СКР	Регионы с минимальным СКР	СКР
Костромская область	1,55	Смоленская область	1,03
Москва	1,42	Рязанская область	1,10
Ивановская область	1,35	Белгородская область	1,12
Московская область	1,35	Владимирская область	1,15
Калужская область	1,34	Орловская область	1,17

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

Таблица 2

Специальный коэффициент рождаемости по типам муниципалитетов ЦФО (2023 год)

Тип муниципалитета	Специальный коэффициент рождаемости (на 1000 женщин 15-49 лет)
Крупные городские агломерации	48,2
Областные центры	52,7
Малые города	61,3
Сельские муниципалитеты	73,8
Периферийные сельские районы	81,5

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

Таблица 3

Показатели вариации суммарного коэффициента рождаемости

Статистический показатель	Значение	Интерпретация
Среднее арифметическое (СКРср)	1,25	Средний уровень рождаемости в ЦФО
Среднее квадратическое отклонение (σ)	0,12	Абсолютная мера вариации
Коэффициент вариации (V)	9,6%	Средняя степень дифференциации между регионами
Средняя ошибка средней величины (m)	0,028	Погрешность выборочной оценки
Доверительный интервал (Р = 95%)	1,195-1,305	Границы среднего значения для генеральной совокупности

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

Таблица 4

Распределение регионов ЦФО по уровню СКР

Группа регионов	Регионы	Количество субъектов	Диапазон значений СКР
С высоким СКР (>1,30)	Костромская область, Москва, Ивановская область, Московская область, Калужская область, Ярославская область, Тверская область	7	1,32-1,55
Со средним СКР (1,20-1,30)	Воронежская область, Курская область, Липецкая область, Тамбовская область, Брянская область	5	1,21-1,28
С низким СКР (<1,20)	Смоленская область, Рязанская область, Белгородская область, Владимирская область, Орловская область, Тульская область	6	1,03-1,19

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

Таблица 2 детализирует эту зависимость, демонстрируя градиент специального коэффициента рождаемости в разрезе типов муниципалитетов ЦФО в 2023 году. Данный показатель, рассчитываемый на 1000 женщин репродуктивного возраста (15-49 лет), позволяет проводить более точные сравнения, нивелируя влияние возрастной структуры населения.

Обнаруживается устойчивая пространственная закономерность, проявляющаяся в виде четкого градиента «город – село». Интенсивность рождаемости демонстрирует систематический рост по мере уменьшения урбанизированности территории – от минимальных значений в крупнейших агломерациях до максимальных показателей в периферийных сельских районах. Такой контраст, достигающий 1,7 раза между крайними точками этого градиента, убедительно свидетельствует о глубине различий в демографическом поведении населения. Проведенный статистический анализ пространственного распределения суммарного коэффициента рождаемости (СКР) по субъектам Центрального федерального округа за 2023 год позволил количественно оценить масштабы региональных различий и выявить устойчивые

территориальные закономерности. Использование аппарата вариационной статистики обеспечило репрезентативность полученных результатов и достоверность выводов исследования (табл. 3, 4).

Полученные данные свидетельствуют о значительной пространственной неоднородности уровня рождаемости в пределах ЦФО. Выявленный разброс значений СКР от 1,03 в Смоленской области до 1,55 в Костромской области демонстрирует глубину региональных различий в репродуктивном поведении населения. Коэффициент вариации на уровне 9,6% подтверждает среднюю степень дифференциации между субъектами округа. Особый научный интерес представляет парадоксально высокий показатель СКР в Москве (1,42), который противоречит традиционной демографической парадигме, связывающей высокую урбанизацию со снижением рождаемости. Это явление требует дополнительного изучения с учетом специфики возрастной структуры населения столицы и эффекта миграционного притока. Типология регионов, представленная в таблице 4, выявляет четкие территориальные закономерности. Регионы с низкими показателями СКР образуют компактный ареал

в юго-западной части ЦФО, тогда как территории с относительно высокой рождаемостью расположены дисперсно. Полученные результаты обосновывают необходимость разработки дифференцированных мер демографической политики с учетом выявленных пространственных закономерностей.

Заключение

Проведенное исследование позволило установить значительную пространственную дифференциацию суммарного коэффициента рождаемости в Центральном федеральном округе. Установлено, что специальный коэффициент рождаемости в периферийных сельских районах (81,5%) в 1,7 раза превышает аналогичный показатель в крупных городских агломерациях (48,2%). Статистический анализ подтвердил наличие значительных межрегиональных различий: разброс значений СКР варьируется от 1,03 в Смоленской области до 1,55 в Костромской области. Коэффициент вариации на уровне 9,6% свидетельствует о средней степени дифференциации между субъектами ЦФО. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости разработки дифференцированной демографической политики, учитывающей выявленные пространственные закономерности и специфику различных типов муниципальных образований. Перспективным направлением дальнейших исследований является углубленный анализ факторов, обуславливающих наблюдаемые территориальные различия в репродуктивном поведении населения.

Список литературы

1. Global fertility in 204 countries and territories, 1950–2021, with forecasts to 2100: a comprehensive demographic analysis for the Global Burden of Disease Study 2021 // The Lancet. 2024. Vol. 403. Is. 10440. P. 2057–2099. DOI: 10.1016/S0140-6736(24)00550-6.
2. United Nations. Department of Economic and Social Affairs, Population Division. World Population Prospects 2019: Volume II: Demographic Profiles. 2019. P. 1-5. URL: https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2019_Volume-II-Demographic-Profiles.pdf (дата обращения: 15.09.2025).
3. Muroishi M., Yakita A. Urbanization and population contraction // Letters in Spatial and Resource Sciences. 2022. Vol. 15. P. 543–553. DOI: 10.1007/s12076-022-00311-x.
4. Adhikari S., Lutz W., KC S. Rural/urban fertility differentials and the role of female education in declining birth rates: comparative analysis in Asia, Africa, and Latin America // Asian Population Studies. 2024. Vol. 21. Is. 3. P. 257–281. DOI: 10.1080/17441730.2024.2430035.
5. Sobotka T., Matysiak A., Brzozowska Z. Policy responses to low fertility: How effective are they? // UNFPA, Population and Development Branch. 2019. Working Paper No. 1. URL: https://www.unfpa.org/sites/default/files/pub-pdf/Policy_responses_to_low_fertility_How_effective_are_they_0.pdf (дата обращения: 15.09.2025).
6. Cividini S., Halbac-Cotoara-Zamfir R., Salvati L. Revisiting the “City Life Cycle”: Global Urbanization and Implications for Regional Development // Sustainability. 2020. Vol. 12. Is. 3. P. 1151. DOI: 10.3390/su12031151.
7. Bampinas G., Mavropoulos G. Asymmetric effects between economic development and fertility: What do 140 years of data tell us? // The Journal of Economic Asymmetries. 2024. Vol. 30. e00368. DOI: 10.1016/j.jeca.2024.e00368.
8. Wu Y., Su B., Li J. The Impact of Low Fertility Rates on Labor Demand and Socioeconomic Development in China // China CDC Weekly. 2023. Vol. 5. Is. 27. P. 599–604. DOI: 10.46234/ccccw2023.115.
9. Maitra B. Globalization, economic and social development, and fertility decline in Bangladesh // Oxford Development Studies. 2024. Vol. 52. Is. 3. P. 279–296. DOI: 10.1080/13600818.2024.2416186.
10. Лебедева Т.В., Сабинов А.П., Шаталова А.В. Развитие сельских территорий: демографический аспект // Философия хозяйства. 2021. № 2 (134). С. 253–271. EDN: KOJUAX.
11. Бондаренко Л.В., Архангельский В.Н. Демографическая ситуация на сельских территориях: оценка и перспективы // Экономика, труд, управление в сельском хозяйстве. 2023. № 10 (104). С. 164–176. DOI: 10.33938/2310-164. EDN: UBFNTS.
12. Кишинин П.А. Итоговая рождаемость реальных поколений в демографических прогнозах: сравнительный анализ перспектив изменений в странах бывшего СССР // Демографическое обозрение. 2023. Т. 10. № 1. С. 79–107. DOI: 10.17323/demreview.v10i1.17261. EDN: RBMCUD.
13. Архангельский В.Н., Калачикова О.Н. Возраст матери при рождении первого ребенка: динамика, региональные различия, детерминация // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2020. Т. 13. № 5. С. 200–217. DOI: 10.15838/esc.2020.5.71.12. EDN: GGMDHG.
14. Смирнов А.В., Лыткина У.В., Чупрова Е.А. Рождаемость на Севере России: пространственные и этнические закономерности // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2025. Т. 18. № 2. С. 194–211. DOI: 10.15838/esc.2025.2.98.11. EDN: ZRXETD.
15. Socio-Economic Security of the Region in the Context of Human Capital Development / N. V. Yakovenko, L. V. Semenova, M. Y. Tsoy [et al.] // Sustainability. 2023. Vol. 15. № 1. P. 404. DOI: 10.3390/su15010404. EDN: IFHMSA.
16. Басовский Л.Е., Басовская Е.Н. О социально-экономических факторах демографических процессов в регионах современной России: рождаемость // Научные исследования и разработки. Экономика. 2023. Т. 11. № 6. С. 27–30. DOI: 10.12737/2587-9111-2023-11-6-27-30. EDN: HFBRDI.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

СТАТЬИ

УДК 502.35:504.53(470.23-25)
DOI 10.17513/use.38452

**ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПЛОДОРОДИЯ
И УСТОЙЧИВОСТИ ПОЧВ САДОВО-ПАРКОВЫХ ТЕРРИТОРИЙ
ЦЕНТРАЛЬНОГО РАЙОНА САНКТ-ПЕТЕРБУРГА**

Брянцев А.В. ORCID ID 0009-0002-2307-6326

*Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности
Российской академии наук – обособленное структурное подразделение*

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

*«Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: briantsev@ecosafety-spb.ru*

Почвы урбанизированных территорий являются важным элементом городских экосистем, но их качество и устойчивость подвергаются значительной антропогенной нагрузке, что требует комплексной оценки. Целью исследования является интегральная оценка плодородия и устойчивости урбанизированных и стратоземов на территории садово-парковых объектов Центрального района Санкт-Петербурга (Летний сад, Михайловский сад, Инженерный сквер). На основе доступных данных агрохимических значений рассчитан интегральный индекс плодородия почв по адаптированной методике (Приказ Минсельхоза РФ № 325 от 06.07.2017) с использованием референтных значений Технологического регламента Комитета по благоустройству Санкт-Петербурга. В качестве показателя устойчивости почв к антропогенным нагрузкам и их способности удерживать питательные элементы определена емкость катионного обмена. Результаты исследования показали, что интегральная оценка плодородия почв на всех рассматриваемых объектах соответствует среднему уровню, что является экологически оптимальным для данных условий, поскольку обеспечивает поддержание насаждений без риска чрезмерного накопления биогенных элементов. Выявлены потенциальные рискиeutrofикации водных объектов города, связанные с миграцией биогенов с поверхностью стоком. Рассчитанные значения емкости катионного обмена свидетельствуют о средней и высокой буферной емкости почв, что обеспечивает эффективное удержание катионов и снижает риск вымывания питательных веществ в гидросферу. Полученные результаты имеют практическую значимость для разработки стратегий управления садово-парковыми территориями мегаполисов.

Ключевые слова: урбанизированные почвы, стратоземы, плодородие, устойчивость почв, садово-парковые территории, интегральная оценка, Санкт-Петербург

**INTEGRATED ASSESSMENT OF SOIL FERTILITY
AND SUSTAINABILITY IN GARDEN AND PARK TERRITORIES
OF THE CENTRAL DISTRICT OF SAINT-PETERSBURG**

Bryantsev A.V. ORCID ID 0009-0002-2307-6326

St. Petersburg Scientific Research Center for Environmental Safety of the Russian Academy of Sciences is a separate structural unit of the Federal State Budgetary Institution “St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences”, Saint-Petersburg, Russian Federation, e-mail: briantsev@ecosafety-spb.ru

Soils in urban areas serve as a vital component of urban ecosystems; however, their quality and stability face significant anthropogenic pressure, necessitating a comprehensive assessment. The aim of this study was to conduct an integrated evaluation of the fertility and stability of Urbic and Stratified soils within the garden and park areas of Central St. Petersburg (specifically, the Summer Garden, Mikhailovsky Garden, and Engineers' Square). Based on available agrochemical data, a comprehensive soil fertility index was calculated using an adapted methodology from Order No. 325 of the Russian Ministry of Agriculture (June 6, 2017), incorporating reference values from the Technical Standards of Saint Petersburg's Committee for Urban Improvement. The cation exchange capacity was determined as an indicator of soil resilience to anthropogenic pressure and nutrient retention capability. The findings demonstrate that the integrated soil fertility assessment across all studied sites corresponds to a moderate level, which is ecologically optimal under these conditions as it supports vegetation maintenance without risks of excessive nutrient accumulation. Potential risks of eutrophication in urban water bodies were identified, associated with nutrient migration through surface runoff. The calculated cation exchange capacity values indicate medium to high soil buffer capacity, ensuring effective cation retention and reducing the risk of nutrient leaching into the hydrosphere. The obtained results hold practical significance for developing management strategies for landscaped park areas in metropolitan environments.

Keywords: urbic soils, technosols, soil fertility, soil resilience, parklands, integrated assessment, St. Petersburg

Введение

На урбанизированных территориях, как и в естественных ландшафтах, почвы выступают ключевым элементом экосистем, в том числе урбозоосистем. Их формирование определяется зонально-климатическими факторами почвообразования, но с доминирующим влиянием антропогенной деятельности [1]. Оценка и прогнозирование влияния урбанизации на почвенный покров и эффективности выполнения им экологических функций представляют собой приоритетную задачу для специалистов в области почвоведения [2]. Качество городских почв служит комплексным индикатором экологического состояния окружающей среды и потенциальным фактором вторичного загрязнения приземного слоя атмосферы, а также поверхностных и подземных вод [3; 4].

Территория Санкт-Петербурга относится к северной периферии Прибалтийской провинции дерново-подзолистых слабогумусированных и болотно-подзолистых почв [1]. Почвенный покров в пределах современных административных границ города отличается высокой пространственно-временной неоднородностью как компонентного состава, так и распределения почвенных ареалов [2]. Под воздействием урбанизированной среды природные факторы почвообразования претерпевают изменения: повышается среднегодовая температура воздуха, сглаживается рельеф, засыпаются мелкие водотоки [1]. Значительная часть площади занята искусственными почвами, созданными человеком и не имеющими аналогов в естественных ландшафтах. В результате

в Центральном районе города сформировался антропогенный слоистый субстрат толщиной до четырех метров и более [2; 5]. Эти образования классифицируются различными экспертами как почвогрунты, техноземы, урбаноземы и аналогичные структуры, отличающиеся разной степенью техногенного загрязнения [3]. В Центральном районе Санкт-Петербурга компактные ареалы почв с тонким насыпным гумусовым горизонтом встречаются во дворах и скверах, реже – вдоль проспектов, занимая менее 5% площади. В зеленых зонах центра, изначально заложенных как парки, преобладают почвы с мощным гумусовым насыпным горизонтом – стратоземы (рис. 1) [2; 6].

В мегаполисах зеленые насаждения в рекреационных зонах выполняют важные функции, включая фильтрацию атмосферы от загрязнителей и оптимизацию микроклиматических условий. В рекреационных зонах городов выделяют следующие подтипы:

- парки и скверы в городской черте с повышенной антропогенной нагрузкой;
- парки и скверы в пригородных районах мегаполиса [7].

Среди наиболее ценных рекреационных объектов Центрального района Санкт-Петербурга выделяются сады Русского музея: Летний сад, Михайловский сад и Инженерный сквер. Уникальность этих объектов, их историческая ценность, а также важность для обеспечения комфортной экологической среды обусловили внимание не только к состоянию зеленых насаждений, но и к почвам как к ключевому фактору, обеспечивающему растениям рост и здоровое функционирование [8-10].



Рис. 1. Почвенная карта Центрального района Санкт-Петербурга
Источник: выдержка из Почвенной карты Санкт-Петербурга (1:50000),
авторы: Сухачева Е.Ю., Апарин Б.Ф., Андреева Т.А. СПбГУ. 2013 г.

Согласно Докладу об экологической ситуации в Санкт-Петербурге за 2024 г., показатель суммарного загрязнения (Zc), отражающий превышение содержания тяжелых металлов над фоновыми значениями, в Центральном районе составил 8,2. Индекс загрязнения почв (ИЗП) по всем исследованным показателям (тяжелые металлы, органические загрязнители), характеризующий превышение поллютантов над предельно допустимыми концентрациями (ПДК), равен 5,1, что указывает на высокий уровень загрязнения [11]. Кроме того, на 25 площадках в рекреационных зонах города были оценены ключевые агрохимические показатели плодородия почв (рН, содержание фосфора (P_2O_5), калия (K_2O), нитратного (NO_3^-) и аммонийного (NH_4^+) азота, гумуса). На обследованных площадках преобладают почвы с высоким содержанием гумуса (39% проб) и фосфора (58% проб). Доля почв с низким содержанием калия составляет 52%, нитратного азота – 38%. Уровень обеспеченности аммонийным азотом высокий во всех пробах (100%)².

Полученные результаты оценки плодородия почв неоднозначны: почвы хорошо обеспечены фосфором и в меньшей степени калием; значительная часть обладает нейтральной или слабощелочной реакцией среды, оптимальной для роста растений. Однако доля почв с высоким и очень высоким содержанием гумуса составляет менее половины проб. Данные мониторинга подтверждают актуальность заявленной темы.

Оценку качества природных сред принято проводить путем сравнения с аналогичной средой вне зоны возможных загрязнений (т.е. с природными или фоновыми содержаниями) либо путем сравнения с расчетными и официально утвержденными нормативно-правовыми показателями (такими как ПДК – предельно допустимые концентрации и ОДК – ориентировочно допустимые концентрации). В случае городских почв сравнение с фоновыми содержаниями затруднительно в связи с их искусственным происхождением. При этом для зеленых городских зон, в частности в Центральном районе Санкт-Петербурга, где преобладает насыпной гумусовый слой, а почвы подвер-

жены сильному антропогенному воздействию, сравнение показателей плодородия с ПДК также нецелесообразно, поскольку эти нормативы не отражают функционального назначения почв [3].

Одним из инструментов системной оценки почв садово-парковых территорий мегаполисов выступает индекс плодородия, представляющий собой количественную метрику способности почвенного субстрата выполнять главную для рекреационной экосистемы функцию – обеспечивать долгосрочную жизнеспособность зеленых насаждений.

Целью настоящего исследования является интегральная оценка плодородия и устойчивости почв садово-парковых территорий Центрального района Санкт-Петербурга (на примере Летнего сада, Михайловского сада и Инженерного сквера), выполненная на основе анализа доступных агрохимических показателей, расчета индекса плодородия и определения емкости катионного обмена.

Материалы и методы исследования

На основании анализа литературных источников для расчета интегральной оценки плодородия почв автором был принят метод согласно Приказу Минсельхоза РФ № 325 от 06.07.2017 г. и адаптирован для проведения настоящего исследования путем добавления параметра доступного азота. Также для расчета был выбран показатель устойчивости почв – емкость катионного обмена (ЕКО).

Проведение оценки обусловлено необходимостью комплексной диагностики состояния почвенного покрова в условиях интенсивной антропогенной нагрузки. Полученные данные позволяют разработать стратегии агроэкологического управления, направленные на снижение рисков деградации экосистем (включая водные), включая потерю плодородия, уменьшение буферной емкости почв и ослабление древесных насаждений.

В зависимости от способов применения и адаптации для городской среды индекс плодородия может называться по-разному, например: Soil Quality Index, Soil Fertility Index, Integrated Fertility Index [12-14]. Расчет производится путем объединения нескольких ключевых агрохимических параметров. Единой универсальной формулы не существует, но общий алгоритм расчета един для разных подходов.

² Доклад об экологической ситуации в Санкт-Петербурге в 2024 году / Под редакцией К.А. Соловейчика, И.А. Себрецкого. СПб., 2025. 206 с. URL: https://www.gov.spb.ru/static/writable/ckeditor/uploads/2025/06/30/59/Доклад_СПб_за_2024.pdf (дата обращения: 07.09.2025).



Рис. 2. Расположение точек отбора проб на территории Летнего сада, Михайловского сада и Инженерного сквера
Примечание: составлено автором на основе источника [8]

ЕКО – это фундаментальное свойство почвы, количественно выраждающее ее способность удерживать и обменивать с почвенным раствором положительно заряженные ионы. Урбанизмы часто характеризуются бедным гранулометрическим составом и низким содержанием гумуса, вследствие чего внесенные удобрения (K^+ , NH_4^+) не задерживаются в зоне корней и быстро вымываются, загрязняя водные экосистемы. ЕКО показывает, способны ли почвы «удерживать» внесенные элементы, что особенно важно для рекреационных зон Центрального района Санкт-Петербурга².

Объектом исследования являются почвы Летнего сада, Михайловского сада и Инженерного сквера, расположенные в Центральном районе Санкт-Петербурга. Значения pH , P_2O_5 , K_2O , NO_3^- , NH_4^+ , содержания гумуса, гидролитической кислотности и суммы обменных оснований, проанализированные в почвах заявленных объектов,

а также отбор проб осуществлялся сотрудниками Лаборатории методов реабилитации техногенных ландшафтов НИЦЭБ РАН – СПб ФИЦ РАН и представлен в публикации «Экотоксикологическая оценка почв садов Русского музея, Санкт-Петербург», вышедшей в журнале «Почвоведение». Исследование проводилось в летний период 2024 года (рис. 2) [8].

Результаты исследования и их обсуждение

Интегральный индекс плодородия почвы (ИПП) рассчитывался как среднее арифметическое отношений фактических значений к оптимальным для пяти агрохимических показателей: pH , содержания подвижного фосфора (P_2O_5), обменного калия (K_2O), доступного азота ($NO_3^- + NH_4^+$) и гумуса.

Таблица 1

Фактические и оптимальные значения выбранных агрохимических показателей почв садов Русского музея

Объект исследования	pH, ед.		Гумус, %		P ₂ O ₅ , мг/100 г		K ₂ O, мг/100 г		NO ₃ ⁻ + NH ₄ ⁺ , мг/100 г	
	факт _{_i}	оптим _{_i}	факт _{_i}	оптим _{_i}	факт _{_i}	оптим _{_i}	факт _{_i}	оптим _{_i}	факт _{_i}	оптим _{_i}
Летний сад	7	6	5,2	5	43,1	15	15,1	15	7,5	8
Михайловский сад	7	6	6,7	5	33,9	15	35,7	15	11,7	8
Инженерный сквер	7,3	6	7,8	5	52,7	15	19,4	15	7,5	8

Примечание: составлено автором на основе полученных расчетов в ходе исследования, а также на основе источника [8] и Технологического регламента Комитета по благоустройству Санкт-Петербурга по содержанию территорий зеленых насаждений.

Расчет проведен в соответствии с формулой, опубликованной в Приказе Минсельхоза РФ № 325 от 06.07.2017 г.:

$$ИПП = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\text{Фактическое значение}_i}{\text{Оптимальное значение}_i} \right),$$

где n – общее количество рассматриваемых агрохимических показателей;

фактическое значение_{_i} – это конкретное численное значение i -го показателя, которое получено в результате лабораторного анализа;

оптимальное значение_{_i} – это эталонное значение для i -го агрохимического показателя.

В качестве фактических значений выбранных параметров были использованы средние значения агрохимических показателей, рассчитанные для каждого объекта (Летнего сада, Михайловского сада, Инженерного сквера) на основе данных, опубликованных в работе «Экотоксикологическая оценка почв садов Русского музея, Санкт-Петербург» [8]. Такой подход обеспечивает презентативность оценки для всего участка, позволяет минимизировать влияние случайных вариаций, обусловленных, например, локальной неоднородностью почв, и соответствует принципам статистической обработки данных в агрохимии.

В качестве оптимальных значений агрохимических показателей были использованы нормативы, установленные Технологическим регламентом Комитета по благоустройству Санкт-Петербурга по содержанию территорий зеленых насаждений. Документ регламентирует целевые параметры плодородия, адаптированные к почвенно-климатическим условиям садово-парковых тер-

риторий города. Важно отметить, что Летний сад, Михайловский сад и Инженерный сквер, согласно классификации Регламента, относятся к объектам зеленых насаждений I категории. Критериями для отнесения к данной категории являются значительный социальный и исторический статус, а также крайне высокая рекреационная нагрузка, что обуславливает необходимость усиленного режима содержания³. С учетом повышенных требований для расчета ИПП были выбраны целевые значения, превышающие минимальные пороги, указанные в Регламенте, на 20–50%. Данный подход направлен на создание «агрохимического буфера» [15].

Фактические и оптимальные значения агрохимических показателей для Летнего сада, Михайловского сада и Инженерного сквера приведены в таблице 1. На основании этих данных был рассчитан интегральный индекс плодородия почв, значения которого представлены в таблице 2.

Емкость катионного обмена (ЕКО) рассчитывалась суммированием двух параметров: суммы обменных оснований и гидролитической кислотности. Для расчета использовались средние значения указанных параметров, определенные для каждого объекта исследования (Летнего сада, Михайловского сада, Инженерного сквера) на основе данных, опубликованных в работе «Экотоксикологическая оценка почв садов Русского музея, Санкт-Петербург» [8]. Результаты расчетов представлены в таблице 3.

³ Технологический регламент производства работ по содержанию территорий зеленых насаждений и ремонту расположенных на них объектов зеленых насаждений. Утвержден Комитетом по благоустройству Санкт-Петербурга 24.10.2024 г. [Электронный ресурс]. URL: <https://gorod.gov.spb.ru/storage/2/165e5e5a-d018-46cf-96ab-af9cf6097811.pdf> (дата обращения: 05.09.2025).

Таблица 2

Результаты расчета интегрального индекса плодородия почв садов Русского музея

Объект исследования	Расчет индивидуальных соотношений, (факт_i / оптим_i)					Интерпретация результатов ИПП, уровень плодородия			
	рН	Гумус	P ₂ O ₅	K ₂ O	NO ₃ ⁻ +NH ₄ ⁺	низкий	средний	высокий	очень высокий
						<0,9	0,9-1,8	1,8-2,7	>2,7
Летний сад	1,167	1,04	2,873	1,007	0,938	-	1,4	-	-
Михайловский сад	1,167	1,340	2,260	2,380	1,463	-	1,7	-	-
Инженерный сквер	1,217	1,560	3,513	1,293	0,938	-	1,7	-	-

Примечание: составлено автором на основе полученных расчетов в ходе исследования, а также на основе источника [8] и Технологического регламента Комитета по благоустройству Санкт-Петербурга по содержанию территорий зеленых насаждений.

Таблица 3

Результаты расчета емкости катионного обмена почв садов Русского музея

Объект исследования	Гидролитическая кислотность, смоль/кг	Сумма обменных оснований, смоль/кг	Емкость катионного обмена, смоль/кг
Летний сад	1,9	22,6	24,5
Михайловский сад	1,6	26,4	28
Инженерный сквер	1,3	28	29,3

Примечание: составлено автором на основе полученных расчетов в ходе исследования, а также на основе источника [8].

Согласно полученным результатам, уровень плодородия почв во всех исследуемых садах можно охарактеризовать как средний. В Летнем саду наблюдается удовлетворительный баланс элементов питания при небольшом дефиците доступного азота; содержание калия находится на нижней границе оптимального диапазона. В Михайловском саду выявлен избыток калия и доступного азота. Для Инженерного сквера характерен небольшой дефицит доступного азота. При этом во всех исследуемых объектах отмечается общий избыток фосфора.

Емкость катионного обмена (ЕКО) в почвах садов Русского музея составила от 24,5 до 29,3 смоль/кг. Полученные значения соответствуют высокой категории для ураноземов и указывают на средне-высокую емкость, что типично для насыпных гумусовых горизонтов с умеренной агрегацией. Такие показатели ЕКО обеспечивают эффективное удержание катионов и буферную емкость по отношению к антропогенным загрязнителям.

Выводы

Проведенная интегральная оценка плодородия почв садов Русского музея в Цен-

тральном районе Санкт-Петербурга выявила средний уровень плодородия (1,4–1,7), что является оптимальным для садово-парковых территорий, функционирующих в условиях высокой рекреационной нагрузки. Такой уровень плодородия обеспечивает устойчивый рост зеленых насаждений без необходимости интенсивного применения удобрений, что минимизирует как затраты на содержание, так и риск деградации ураноземов.

Рассчитанные значения емкости катионного обмена, находящиеся в диапазоне 24,5–29,3 смоль/кг, свидетельствуют об эффективном удержании питательных катионов (K⁺, NH₄⁺) в корнеобитаемой зоне. Это снижает риск их вымывания и, как следствие, минимизирует вторичное загрязнение реки Невы. Одновременно буферная емкость способствует стабилизации реакции почвенной среды (рН), что критически важно для поддержания доступности элементов питания и иммобилизации присутствующих поллютантов, в частности тяжелых металлов.

На основе полученных результатов разработаны следующие рекомендации:

– Летний сад: оптимизация режима внесения азотных удобрений для поддержки ро-

ста растений при исключении риска эвтрофикации; снижение применения фосфорных удобрений во избежание загрязнения поверхностных вод.

– Михайловский сад: ограничение применения калийных и азотных удобрений для минимизации риска выщелачивания в грунтовые воды; снижение применения фосфорных удобрений во избежание загрязнения поверхностных вод.

– Инженерный сквер: оптимизация режима внесения азотных удобрений для поддержки роста растений при исключении риска эвтрофикации; снижение применения фосфорных удобрений во избежание загрязнения поверхностных вод.

Таким образом, применение интегральной оценки плодородия и устойчивости почв является эффективным инструментом для перехода к адаптивному и экологически сбалансированному управлению рекреационными территориями в условиях городской среды. Данный подход позволяет перейти от разрозненного анализа отдельных агрохимических показателей к комплексной диагностике состояния почвенного покрова, обеспечивает раннее выявление экологических рисков и повышает эффективность бюджетных расходов за счет целевого распределения ресурсов.

Список литературы

1. Русаков А.В., Шешукова А.А., Бахматова К.А. Городские почвы Санкт-Петербурга и история их изучения // Окружающая среда Санкт-Петербурга. 2024. № 3 (33). С. 57–61. URL: https://ecopeterburg.ru/wp-content/uploads/2024/09/OS-33_постранично.pdf (дата обращения: 02.09.2025).
2. Сухачева Е.Ю. Почвы Санкт-Петербурга // Окружающая среда Санкт-Петербурга. 2024. № 3 (33). С. 49–56. URL: https://ecopeterburg.ru/wp-content/uploads/2024/09/OS-33_постранично.pdf (дата обращения: 01.09.2025).
3. Горыкий А.В. Исследование качества почв и грунтов Санкт-Петербурга // Окружающая среда Санкт-Петербурга. 2024. № 3 (33). С. 64–75. URL: https://ecopeterburg.ru/wp-content/uploads/2024/09/OS-33_постранично.pdf (дата обращения: 03.09.2025).
4. Поляк Ю.М., Бакина Л.Г., Маячкина Н.В., Дроздова И.В., Каплан А.В., Голод Д.Л. Биодиагностика состояния окультуренной городской почвы, загрязненной тяжелыми металлами, методами биоиндикации и биотестирования // Почва и окружающая среда. 2018. № 1. С. 231–242. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36869794> (дата обращения: 01.09.2025). DOI: 10.31251/pos.v1i4.34.
5. Решетов В.В., Коршак К.А., Матвеев К.А. Создание банка образцов как инструмент контроля динамики загрязнения почв Санкт-Петербурга в долгосрочной перспективе // Окружающая среда Санкт-Петербурга. 2024. № 3 (33). С. 76–81. URL: https://ecopeterburg.ru/wp-content/uploads/2024/09/OS-33_постранично.pdf (дата обращения: 04.09.2025).
6. Решетов В.В., Коршак К.А., Ладина К.А. Оценка загрязнения почвогрунтов Санкт-Петербурга по данным мониторинга // Окружающая среда Санкт-Петербурга. 2024. № 3 (33). С. 89–99. URL: https://ecopeterburg.ru/wp-content/uploads/2024/09/OS-33_постранично.pdf (дата обращения: 06.09.2025).
7. Решетов В.В., Коршак К.А., Ладина К.А. Концепция актуализации мониторинга загрязнения почвогрунтов в Санкт-Петербурге // Окружающая среда Санкт-Петербурга. 2024. № 3 (33). С. 82–88. URL: https://ecopeterburg.ru/wp-content/uploads/2024/09/OS-33_постранично.pdf (дата обращения: 05.09.2025).
8. Бакина Л.Г., Герасимов А.О., Жукова Е.А., Чугунова М.В., Маячкина Н.В., Поляк Ю.М., Горбунова Е.А., Галдиянц А.А., Брянцев А.В. Экотоксикологическая оценка почв садов Русского музея, Санкт-Петербург // Почвоведение. 2025. № 5. С. 674–687. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=81299306> (дата обращения: 01.09.2025). DOI: 10.31857/S0032180X25050106.
9. Капелькина Л.П., Мельничук И.А., Часовская В.В. Почвы Летнего сада // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2007. № 180. С. 86–95. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=9593508> (дата обращения: 01.09.2025).
10. Матинян, Н. Н. Почвы Летнего сада (Санкт-Петербург) // Почвоведение. 2017. № 6. С. 643–651. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29404702> (дата обращения: 01.09.2025). DOI: 10.7868/S0032180X17060065.
11. Мязин В.А. Определение остаточного содержания углеводородов и продуктов их трансформации при загрязнении окультуренных подзолистых почв в Евро-Арктическом регионе // Вестник Кольского НЦ РАН. 2015. № 1. С. 126–131. URL: http://kolanord.ru/html_public/periodika/Vestnik_KNC/Vestnik_KNC_2015_1/127/ (дата обращения: 01.09.2025).
12. Chaudhry H., Vasava H.B., Chen S., Saurette D., Beri A., Gillespie A., Biswas A. Evaluating the Soil Quality Index Using Three Methods to Assess Soil Fertility // Sensors (Basel). 2024. Vol. 24. Is. 3. P. 864. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC10857350/> (дата обращения: 26.10.2025). DOI: 10.3390/s24030864.
13. Xie X., Cai J., Yang X. et al. Integrated assessment of soil quality and contaminant risks in salinized farmland adjacent to an oil-exploitation zone: insights from the Yellow River Delta // Scientific Reports. 2024. Vol. 14. P. 29369. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-024-80314-4> (дата обращения: 20.09.2025). DOI: 10.1038/s41598-024-80314-4.
14. Jin J., Wang L., Müller K., Wu J., Wang H., Zhao K., Beringer F., Fu W. A 10-year monitoring of soil properties dynamics and soil fertility evaluation in Chinese hickory plantation regions of southeastern China // Scientific Reports. 2021. Vol. 11. P. 23531. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-021-02947-z> (дата обращения: 01.09.2025). DOI: 10.1038/s41598-021-02947-z.
15. Капелькина Л.П. Причины гибели зеленых насаждений в городской среде (на примере Санкт-Петербурга) // Экология урбанизированных территорий. 2016. № 3. С. 62–65. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27519203> (дата обращения: 01.09.2025).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование: Данное исследование выполнено в рамках государственного задания НИЦЭБ РАН – СПб ФИЦ РАН по теме «Разработка методов мониторинга здоровья экосистем Северо-Запада России» (FFZF-2025-0018).

Financing: This study was performed within the state assignment of the RCES RAS – SPB FRC RAS on the topic “Development of methods for monitoring the health of ecosystems in the North-West of Russia” (FFZF-2025-0018).“

ИДЕНТИФИКАЦИЯ КОМПОНЕНТОВ ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА ИЛАССКОГО БОЛОТНОГО МАССИВА НА ОСНОВЕ ИЗОТОПНЫХ ДАННЫХ ($\delta^{2\text{H}}$ – $\delta^{18\text{O}}$)

¹Лизунова М.А., ¹Яковлев Е.Ю., ¹Чупаков А.В., ¹Прасолов С.Д., ²Токарев И.В.

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

«Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лаверова УрО РАН», Архангельск, Российская Федерация, e-mail: marigeo17@rambler.ru;

²Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Экосистемы верховых болот, занимающие значительную часть территории Северо-Запада России, являются важными маркерами изменения климатических характеристик. Ввиду этого возрастает актуальность оценки гидрологических параметров верховых болот и питающихся преимущественно болотными водами малых водотоков. Цель исследования – идентифицировать компоненты формирования стока Иласского болотного массива и его эволюцию на основании вариаций изотопных отношений воды в рамках гидрологического континуума «болото – малая река». Работы были проведены на характерном для территории Архангельской области болотном массиве, относящемся к верховым торфяникам южноприбелиорского типа. Выполнено опробование болотных вод на различных микроландафтах, а также стоковых и подземных вод гидрологического континуума. Для оценки вклада различных по генезису вод в общий баланс континуума применен метод стабильных изотопов воды, заключающийся в изменении вариаций изотопного состава воды при ее сезонных переходах в различные фазы (замерзания, испарения, конденсаций). Анализ изотопного состава проб выявил вариации значений $\delta^{18\text{O}}$ и $\delta^{2\text{H}}$ для каждого типа вод гидрологического континуума, что позволило идентифицировать специфику их образования и сезонные различия формирования стока, а также сравнить долю испарения и разгрузки болотных вод в общем гидрологическом цикле. Результаты исследования подтвердили формирование стока с массива преимущественно внутренними болотными водами, показав при этом дополнительный подток грунтовых вод за пределами болота.

Ключевые слова: болотные экосистемы, сток, изотопная гидрология, изотопы $\delta^{2\text{H}}$ и $\delta^{18\text{O}}$

IDENTIFICATION OF RUNOFF COMPONENTS OF FORMATION OF THE ILAS BOG MASSIF BASED ON ISOTOPE DATA ($\delta^{2\text{H}}$ – $\delta^{18\text{O}}$)

¹Lizunova M.A., ¹Yakovlev E.Yu., ¹Chupakov A.V., ¹Prasolov S.D., ²Tokarev I.V.

¹Federal State Budgetary Institution of Science “Federal Research Center for the Integrated Study of the Arctic named after Academician N.P. Laverov Ural Branch of the Russian Academy of Sciences”, Arkhangelsk, Russian Federation, e-mail: marigeo17@rambler.ru;

²Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «St. Petersburg State University», St. Petersburg, Russian Federation

The ecosystems of the upland bogs, which occupy a significant part of the territory of the North-West of Russia, are important markers of climate change. In view of this, the relevance of assessing the hydrological parameters of upland bogs is increasing and small watercourses primarily sustained by bog drainage. The objective of this research is to identify the components contributing to the runoff of the Illassky bog massif and its evolution within the hydrological continuum of the bog – small river, based on variations in water isotopic ratios. The research was carried out on a bog massif, which is a typical swamp of the southern White-Sea type, common in the Arkhangelsk region. The bog's waters samples were collected from various micro-landscapes, as well as from runoff and groundwater across the entire hydrological continuum. To assess the contribution of waters of different origins to the overall balance of the continuum, the method of stable water isotopes has been used. This method involves measuring variations in the isotopic composition of water during its seasonal transitions into different phases (freezing, evaporation, and condensation). Analysis of the isotopic composition of samples revealed variations in values $\delta^{18\text{O}}$ and $\delta^{2\text{H}}$ for each type of water of the hydrological continuum, which allowed to identify the specificity of their generation and seasonal differences in runoff formation, as well as to compare the proportion of evaporation and discharge of bog's waters to the overall hydrological cycle. The results of the study confirmed the formation of runoff from the massif mainly by internal bog waters, with additional groundwater inflow outside the bog massif.

Keywords: bog ecosystems, runoff, isotope hydrology, isotopes $\delta^{2\text{H}}$ и $\delta^{18\text{O}}$

Введение

В условиях изменяющегося климата важной задачей становится оценка гидрологического режима таких ключевых для севе-

ро-запада экосистем, как верховые болота. Выявлено [1; 2], что в ответ на изменения климатических характеристик могут трансформироваться гидрологические параметры

болотных массивов – уровни болотных вод, глубина промерзания, расход стока и т.п., что в свою очередь влияет на формирование стока малых водотоков, питающихся преимущественно болотными водами.

В последнее время для решения гидрологических задач все чаще применяют изотопный метод, позволяющий идентифицировать не только генезис вод, но и условия их формирования [3-5]. Метод основан на изменении изотопного состава воды в разных процессах гидрологического цикла. В результате испарения или замерзания воды происходит фракционирование молекул воды по изотопам кислорода и водорода. Ряд наблюдений за вариациями изотопных параметров позволяет составить более полную картину гидрологического режима изучаемых объектов и выделить различные компоненты стока: осадки, подземные и поверхностные воды и др.

В связи с этим для оценки компонентов стока и уточнения водного баланса был выбран близкорасположенный к г. Архангельску типовой для региона болотный массив Иласский, обеспеченный большим количеством гидрометеорологических наблюдений [6, с. 29; 7].

Цель исследования: идентифицировать компоненты формирования стока Иласского болотного массива (далее – ИБМ) и его эволюцию на основании вариаций изотопных отношений воды в рамках гидрологического континуума «болото – малая река».

Материалы и методы исследования

Исследование проведено в Приморском районе Архангельской области на гидрологическом континууме ИБМ – река Черная, расположенному в заболоченной части таежных лесов. Исследуемый болотный массив обладает площадью 89 км², возраст приблизительно 10–11 тыс. лет, сложен торфами слабой степени разложения на всю глубину залежи, подстилается озерно-ледниковыми отложениями (глины, пески) [6, с. 29; 8]. Постледниковый рельеф территории привел к заболачиванию территории по суходольному типу, что предопределило морфологию болота и омбротрофный тип питания [9]. В пределах массива выделены центральное плато с грядово-мочажинным комплексом, краевой склон с системой гряд, мочажин и озерков, трансгрессионная окраина [3; 6, с. 30]. Принадлежность ИБМ к типовым для региона верховым болотам южноприбеломорского типа [10] послужила причиной выбора массива в качестве объекта исследования.

Отбор проб воды проводился в период с сентября 2022 года по декабрь 2023 включительно, с различной периодичностью с учётом смены гидрологических циклов. Точки опробования были выбраны с учетом различных физико-географических особенностей каждого типового комплекса как болотного массива, так и за его пределами (рис. 1), поскольку морфология верховых болот оказывает прямое влияние на их гидрологические параметры [10; 11].



Рис. 1. Схема точек отбора проб
Примечание: составлено авторами

Внутренние болотные воды (на рисунках – ВБВ) отбирались из гидрологических скважин, находящихся на разных микроландшафтных комплексах болота: грядово-озерковый комплекс (точка РЗ 4), грядово-мочажинный комплекс (точка РЗ 3), переходная зона (точка РЗ 2), окрайка болота в лесной зоне (точка РЗ 1). Воды грядово-озерково-мочажинного комплекса (на рисунках – ГОМк) были представлены, соответственно, поверхностными водами мочажин и озер. Трансформацию болотного стока прослеживали на примере двух водотоков, берущих начало в окраине ИБМ: левого притока реки Черной (точки I2-1 – I2-4), пополняющегося с грядово-озерково-мочажинного комплекса, и правого (точки I1-1 – I1-4), формирующегося «подповерхностными» болотными водами, а также в результирующей точке (I 1), где соединяются оба водотока, на расстоянии около трех километров после слияния. Как маркеры подземных вод (на рисунках - ПВ) исследованы грунтовые воды из скважины (точка S), пробуренной на глубину 5 м, и поселкового колодца (точка K), оборудованного на месте выхода напорных грунтовых вод путем самоизлива.

Пробы отбирались через мембранный фильтр с использованием стерильных шприцев и шприцевых насадок в герметично закрывающиеся пластиковые пробирки. До момента анализа пробы находились в холодильной камере. Изотопный состав воды измерен в Ресурсном центре «Рентгенодифракционные методы исследования» Научного парка СПбГУ на лазерном спектрометре Picarro L2130i. Использован стандарт VSMOW2. Аналитическая воспроизведимость измерений составила $\pm 0.02\text{‰}$ для $\delta^{18}\text{O}$ и $\pm 0.1\text{‰}$ для $\delta^2\text{H}$.

Результаты исследования и их обсуждение

В основе метода изотопных индикаторов кислорода-18 идейтерия, примененного в данном исследовании и активно использующегося для решения различных задач [3; 5; 12] в гидрологии и климатологии, лежит постоянство общего количества стабильных изотопов $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ в составе водных молекул при разнице их состава в водах различных фаз и генезиса. Существуют определенные закономерности накопления тяжелых или легких изотопов кислорода и водорода при фракционировании воды в результате ее перехода в различные фазы (испарение, конденсация, замерзания), хорошо описанные в работах [13, с. 275; 14, с. 15]. Таким образом, при нанесении результатов анализов на стандартную диаграмму распределения изотопов $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$, становятся видны тренды различных типов вод, а по их отклонению или расположению вблизи прямой изотопного состава атмосферных осадков – Глобальной линии метеорных вод (здесь и далее – ГЛМВ), уравнение которой имеет вид $\delta\text{D} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$ [14, с. 23], – можно делать выводы о фракционировании воды, ее происхождении, возрасте и зависимости от различных факторов, таких как сезонность, географическая широта расположения объекта и высотность отбора проб [14, с. 21]. Для более точного анализа вод в различных широтах дополнительно принято использовать Локальную линию метеорных вод (здесь и далее – ЛЛМВ), которая отражает изотопный состав атмосферных осадков, характерных для того или иного климатического пояса и региона. Для Приморского района Архангельской области ЛЛМВ описана в [3] и использовалась для анализа в данном исследовании.

Максимальные и минимальные значения $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ для разных типов исследуемых природных вод

Тип исследуемых вод	$\delta^{18}\text{O}, \text{‰}$		$\delta^2\text{H}, \text{‰}$	
	min	max	min	max
Подземные воды (гидрогеологическая скважина)	-15.16	-12.19	-111,5	-89,86
Подземные воды (колодец)	-14.29	-13.82	-103,47	-98,24
Внутриболотные воды (гидрологические скважины)	-16.08	-8.4	-117,1	-61,8
Воды грядово-озерково-мочажинных комплексов	-10.97	-4.68	-79,9	-57,7
Воды начала стока	-15.55	-9.24	-114,2	-75,9
Воды речного стока	-14.14	-9.62	-105,4	-71,9

Примечание: составлено авторами на основе данных, полученных в процессе исследования.

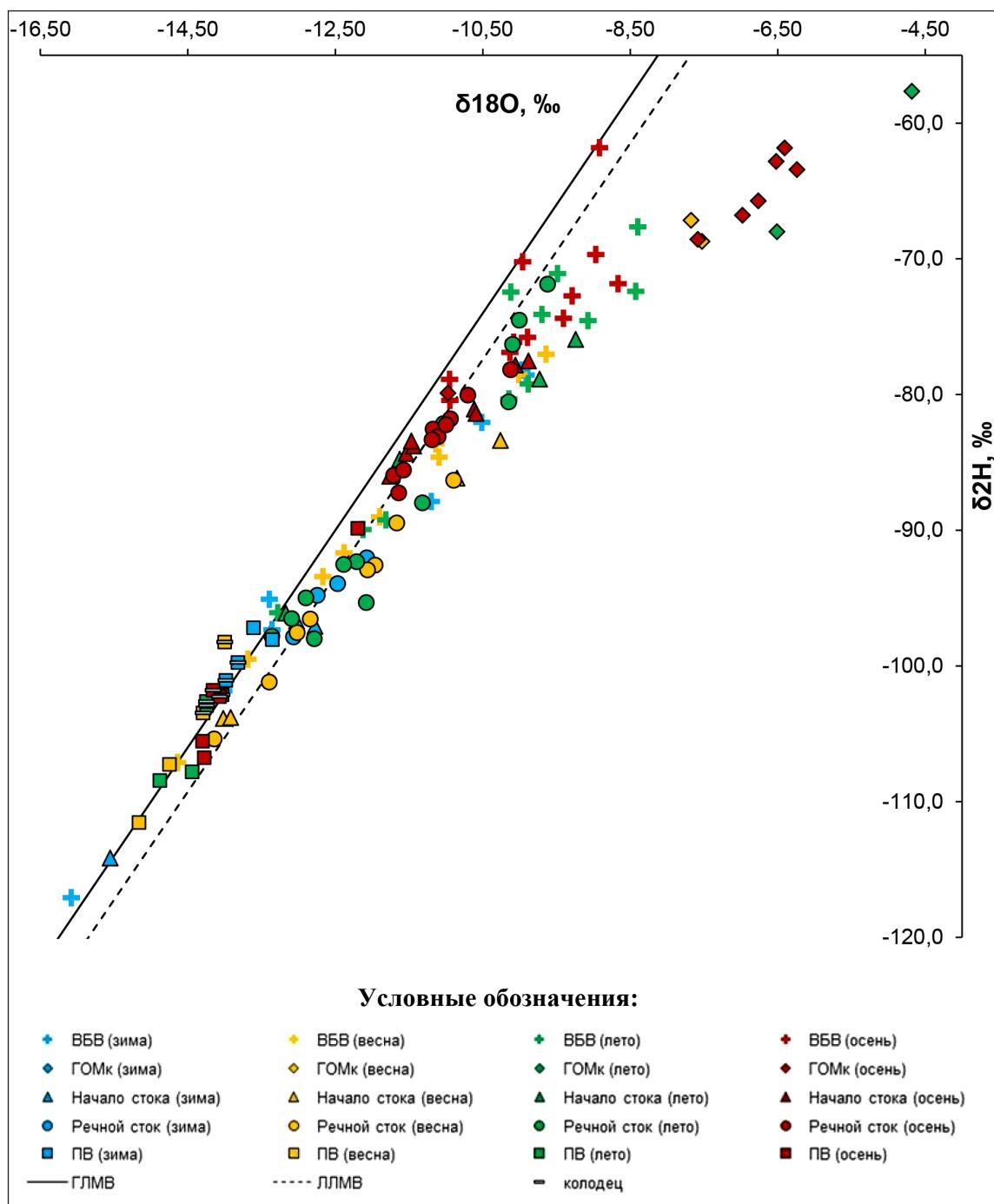


Рис. 2. Диаграмма соотношений $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{2}\text{H}$
Примечание: составлено авторами на основе данных, полученных в процессе исследования.

Результаты анализов на изотопный состав всех опробуемых типов вод, а также линии ГЛМВ и ЛЛМВ нанесены на диаграмму (рис. 2).

Распределение значений $\delta^{2}\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ разных по генезису типов вод отражено в таблице.

Опираясь на закономерности распределения значений $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^{2}\text{H}$ для различных

типов вод [13, с. 274] в вышеуказанных диапазонах и их положение по отношению к линиям ГЛМВ и ЛЛМВ, можно проследить изменения фракционирования вод в разные фазы гидрологического режима, а также выявить предполагаемые источники питания и разгрузки для каждого типа природных вод, описанных в исследовании.

Хорошо просматривается на диаграмме сезонная зависимость для внутриболотных и поверхностных вод, которая выражается в распределении результатов анализа данных проб вдоль линий метеорных вод и их широком диапазоне в течение года (согласно вышеуказанным вариациям). Так, пробы зимнего сезона расположены в так называемой зоне замерзания, характеризующейся «облегченным» составом изотопов. Выше по линии располагаются весенние пробы внутриболотных вод и речного стока (включая начало стока), постепенно «утяжеляясь», что говорит о преимущественном питании стока в весенне половодье талыми водами. Наблюданная разница между расположением на диаграмме поверхностных вод начала стока (исток у болота) и стока в лесной зоне объясняется дополнительной подпиткой реки грунтовыми водами в лесной зоне за пределами болотного массива, что подтверждается натурными наблюдениями и показаниями pH [15-17]. Согласно полевым наблюдениям, значительное количество подземных вод поступает в правый приток реки Черная до точки отбора 11-3 в неустановленном месте, что приводит к смешению изотопного состава и отображается на диаграмме – пробы речного стока имеют более «легкие» значения в сравнении с пробами начала стока.

В весенне-летний сезон внутренние болотные и поверхностные воды аппроксимируются к ЛЛМВ, что объясняется значительным вкладом дождевых осадков в их питание в этот период. Причем данные пробы сильнее «прижаты» к ЛЛМВ, чем к ГЛМВ, поскольку ЛЛМВ построена непосредственно по метеорным водам Северо-Западного региона [3]. Наиболее ярко выражена аппроксимация поверхностных вод к ЛЛМВ в осенний паводок – следы обильных дождевых осадков начала осеннего сезона. Внутриболотные воды с началом теплого периода и до наступления снеговых осадков ведут себя на диаграмме отлично от поверхностных: анализы данных проб более «тяжелые» и начинают скапливаться в так называемой зоне испарения, где сконцентрированы все пробы грядово-озерково-мочажинного комплекса. Это говорит о значительном вкладе испарения в водный баланс болотного массива, даже через растительный покров, в среднем с мая по сентябрь. Преобладание в этой зоне проб грядово-озерково-мочажинного комплекса объясняется более интенсивным испарением с открытой поверхности застойных вод озерков и мочажин, чем из внутриболотных вод, поскольку специфика болотной растительности способствует удержанию влаги внутри деятельного слоя в засушливый период [9].

Иначе выглядит сезонная зависимость для грунтовых вод: так, на диаграмме наблюдается распределение результатов анализа вод из скважины вдоль ГЛМВ, но с гораздо меньшим диапазоном в отличие от поверхностных и внутриболотных вод. Также наблюдается «отставание» сезонной зависимости проб от описанных выше зависимостей для речных и внутриболотных вод. Все это объясняется питанием данного типа вод путем инфильтрации с учетом замедленного цикла водообмена. Однако результаты анализов колодезных вод практически не показывают сезонной зависимости, имеют наименьший из всех типов вод диапазон вариаций, сконцентрированы в одной зоне – сдвинуты немного влево от ГЛМВ. Учитывая, что колодец наполняется напорными водами более глубокого водоносного горизонта, а концентрация изотопов находится в зоне «легких» изотопов, можно предположить их постледниковое происхождение, поскольку перевес в сторону более легких изотопов накапливается за счет чередования циклов замерзания и испарения [14, с. 19]. Как уже обозначено выше, постледниковый рельеф территории оказывается на ее гидрологии, однако речные и болотные воды за счет преимущественно атмосферного питания постоянно обновляются, в то время как грунтовые воды имеют более долгий цикл водообмена и, как следствие, отличающийся от других типов вод изотопный состав. Также оба типа подземных вод приурочены к ГЛМВ, что объясняется меньшим влиянием на них атмосферных осадков, чем на поверхностные воды.

Также благодаря данному методу есть возможность идентифицировать компоненты стока ИБМ, дополняя полевые наблюдения. Воды болотного массива формируются преимущественно за счет атмосферных осадков, накапливаясь частично в теле болотной залежи (внутренние болотные воды), частично формируя застойные воды в локальных понижениях (мочажинах) и озерах, которые в летний сезон подвергаются интенсивному испарению. Вода, удерживаемая в теле болотной залежи, также подвергается фракционированию и смешению изотопного состава на протяжении сезона, но более медленно, в отличие от воды, стекающей из болота и образующей речной сток.

За пределами болотной залежи сток формируется из разных источников питания. Ручьи, вытекающие с болота, протекают сначала через окраину залежи и затем уходят в лесную зону по разным руслам. При этом пробы из левого притока (начало стока, точки I2-1 – I2-2) больше коррелируют с составом внутренних болотных вод, что отображается на диаграмме, в то время как пробы речного стока правого притока реки Черная (точки, II-3 и II-4), расположенные в лесной зоне, несколько отличаются по изотопному составу. Здесь к болотному питанию совместно с атмосферным добавляется питание грунтовыми водами – это заметно по расположению анализов проб вод речного стока на диаграмме и по дополнительным результатам полевых измерений [15-17].

Признаков участия грунтовых вод в питании болотного массива не наблюдается.

Заключение

Анализ изотопного состава проб выявил характерные для каждого типа вод гидрологического континуума интервалы значений $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^{2}\text{H}$, что позволяет идентифицировать специфику их образования.

Установлено, что болотные воды имеют преимущественно атмосферное питание, средний изотопный состав внутренних болотных вод $\delta^{18}\text{O} = -10,90\text{\textperthousand}$ и $\delta^2\text{H} = -82,5\text{\textperthousand}$, вод грядово-озерково-мочажинных комплексов $\delta^{18}\text{O} = -7,08\text{\textperthousand}$ и $\delta^2\text{H} = -66,40\text{\textperthousand}$.

Установлена сезонная смена источников питания стоковых вод (метеорные воды в половодье и болотные воды в меженный период), средний изотопный состав стоковых вод $\delta^{18}\text{O} = -11,73\text{\textperthousand}$ и $\delta^{2}\text{H} = -88,55\text{\textperthousand}$, выявлено дополнительное питание реки Черная грунтовыми водами за пределами болотного массива.

Не обнаружено явной связи между водоносными горизонтами грунтовых и болотных вод. Средний изотопный состав подземных вод $\delta^{18}\text{O} = -14,11\text{\%}$ и $\delta^2\text{H} = -102,59\text{\%}$.

В процессе исследования изотопные данные дополнili результаты полевых наблюдений и подтвердили формирование стока с массива преимущественно внутренними болотными водами, показав при этом дополнительный подток грунтовых вод уже за пределами болота. При помощи распределения изотопов в разных зонах диаграммы удалось оценить вклад испарения и разгрузки болотных вод в общем гидрологическом цикле.

Использованный метод позволяет на качественном уровне оценивать соотношение

того или иного типов питания поверхностных вод, при отсутствии данных классических гидрологических наблюдений на водном объекте. В связи с этим полученные данные необходимы при интерпретации элементного состава поверхностных вод и для дальнейших выводов об экологическом состоянии водного объекта. Таким образом, результаты исследования могут быть использованы для оценки и контроля геэкологического состояния территории.

Список литературы

- ротаежного района Архангельской области: дис. ... канд. с.-х. наук. Архангельск, 2022. 180 с. URL: <https://narfu.ru/upload/iblock/5b6/avtoreferat.pdf?ysclid=mgy7ujnh1836374305> (дата обращения: 20.04.2025).
10. Юрковская Т.К. Болота Архангельской области: ботанико-географические особенности и динамическое состояние // IX Галкинские Чтения: Материалы конференции (Санкт-Петербург, 05–07 февраля 2018 года). СПб.: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 2018. С. 243–246. URL: <https://www.binran.ru/science/publikatsii/materialy-konferentsiy/galkinskie-cteniya> (дата обращения: 29.07.2025).
11. Панов В.В. Основные аспекты морфологии болот // XIII Галкинские Чтения: Материалы конференции (Санкт-Петербург, 9–10 апреля 2025 года). СПб.: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 2025. С. 6–17. URL: <https://www.binran.ru/science/publikatsii/materialy-konferentsiy/galkinskie-cteniya> (дата обращения: 30.07.2025).
12. Токарев И.В., Яковлев Е.Ю., Бородулина Г.С. Климатические причины происхождения ураганных неравновесных отношений $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ в подземных водах северо-Запада России // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-запада России. 2024. № 11. С. 678–689. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/klimaticheskie-prichiny-proishozhdeniya-uragannyyh-neravnoesnyh-otnosheniy-u-u-v-podzemnyh-vodah-severo-zapada-rossii?ysclid=mh0gplli4i966122030> (дата обращения: 20.08.2025). DOI: 10.24412/2687-1092-2024-11-678-689.
13. Гидрометеорологический режим и водный баланс верховых болот Северо-Запада России (на примере Ламмин-Суо) / Под ред. С.М. Новикова, В.И. Батуева. СПб., 2019. 448 с. URL: <https://hydrology.ru/gidrometeoro- logiceskii-rezim-i-vodnyi-balans-verkhovuyx-bolot-severo-zapada-rossii-na-primere-bolota-lammin-suo> (дата обращения: 20.09.2025). ISBN 978-5-4386-1701-3.
14. Екайкин А.А. Стабильные изотопы воды в гляциологии и палеогеографии / Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации и др. СПб., 2016. 63 с. URL: https://mgmtmo.ru/edumat/polar/Ekaikin_2016.pdf?ysclid=mh0ke2bk4c707826856 (дата обращения: 06.09.2025). ISBN: 978-5-98364-076-4.
15. Биогеохимия углерода и сопряженных микроэлементов в экосистемах торфяных болот Северо-Запада России в гидрологическом континууме: отчет о НИР / С. Б. Селянина и др. Архангельск: ФИЦКИА РАН, 2024. 52 с. URL: <https://rsef.ru/project/22-17-00253/?ysclid=mgy96v8u1v605351803> (дата обращения: 10.09.2025).
16. Чупаков А.В., Забелина С.А., Прасолов С.Д., Чупакова А.А., Прилуцкая Н.С., Шпанов Д.А., Селянина С.Б., Широкова Л.С. Суточная динамика гидрохимических показателей в гидрологическом континууме Илласского болотного массива // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: Материалы V Всероссийской научной конференции с международным участием имени профессора С.Л. Шварцева (Томск, 16–21 октября 2023 года). Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2023. С. 213–216. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=55322535&ysclid=mgy9awuu722224072> (дата обращения: 15.09.2025).
17. Трудова Н.С., Мухортина Н.А., Чупаков А.В. Широкова Л.С., Иванова И.С. Распределение полициклических ароматических углеводородов в водах Илласского болотного массива в весенне-летний период // III Юдахинские чтения: сборник научных материалов (Архангельск, 25–28 июня 2024 года). Архангельск: КИРА, 2024. С. 191–195. URL: <https://yudakhin.fciarctic.uran.ru> (дата обращения: 15.09.2025).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование: Исследование выполнено в рамках темы ФНИР «Особенности миграции элементов и их изотопов в компонентах окружающей среды Западного сектора Российской Арктики в условиях климатических и техногенных изменений», № государственной регистрации 125022002727-2.

Financing: The research was carried out within the framework of the FNR topic “Features of migration of elements and their isotopes in the environmental components of the Western sector of the Russian Arctic in the context of climatic and man-made changes, state registration no. 125022002727-2.

СТАТЬИ

УДК 624.139.34(571.56)
DOI 10.17513/use.38454

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА НАСЫПИ АВТОДОРОГИ И ГРУНТОВ ОСНОВАНИЙ В УСЛОВИЯХ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ ЯКУТИИ

¹Малышев А.В., ¹Тимофеев А.М., ¹Большев К.Н., ²Цеева А.Н.

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова, Якутск, Российская Федерация, e-mail: k.bolshev@mail.ru;

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Российская Федерация

С целью прогнозной оценки устойчивости и состояния насыпи, откосов и грунтового основания автомобильной дороги в условиях многолетнемерзлых грунтов была разработана и реализована математическая модель теплового взаимодействия асфальтовой автодороги с подстилающим грунтом и атмосферой. Модель учитывает фазовые переходы поровой влаги, сезонные колебания температуры воздуха, изменения скорости ветра, приток тепла за счет солнечной радиации с учетом отражающей способности поверхностей, влияние сезонного снегового покрова и его профиль в результате регулярной очистки автодороги от снега. В ходе моделирования для определения параметров модели и граничных условий были использованы как нормативные методики, так и альтернативные полуэмпирические выражения, что обеспечило устойчивость и адекватность модели. Реализация и решение модели проводилось в среде мультифизического моделирования Comsol Multiphysics с применением метода конечных элементов. Полученные в результате математического моделирования прогнозные данные показывают постепенное охлаждение грунтов основания и насыпи и подтверждают ее стабильное мерзлое состояние на период эксплуатации при условии отсутствия влияющих на тепловой режим нештатных ситуаций (изменение грунтовых условий, переувлажнение и заболачивание территории, разрушение участка автодороги и прочие нарушения эксплуатации).

Ключевые слова: многолетнемерзлые грунты, автодорога, насыпь, температурный режим, моделирование, основания

MODELING THE TEMPERATURE REGIME OF ROAD EMBANKMENT AND SOILS BASED ON PERMAFROST CONDITIONS IN YAKUTIA

¹Malyshev A.V., ¹Timofeev A.M., ¹Bolshev K.N., ²Tseeva A.N.

¹Federal State Budgetary Institution of Science Federal Research Center

“Yakutsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”

V.P. Larionov Institute of Physico-Technical Problems of the North, Yakutsk,

Russian Federation, e-mail: k.bolshev@mail.ru;

²Federal State Budget Educational Institution of Higher Education

«Industrial University of Tyumen», Tyumen, Russian Federation

To predict the stability and condition of the embankment, slopes, and subgrade of a highway in permafrost conditions, a mathematical model of the thermal interaction of an asphalt road with the underlying soil and the atmosphere was developed and implemented. The model takes into account phase transitions of pore moisture, seasonal fluctuations in air temperature, changes in wind speed, heat gain from solar radiation, taking into account surface reflectivity, the impact of seasonal snow cover, and its profile resulting from regular snow removal. During the simulation, both standard methods and alternative semi-empirical expressions were used to determine the model parameters and boundary conditions, ensuring the model's robustness and adequacy. The model was implemented and solved in the Comsol Multiphysics simulation environment using the finite element method. The predictive data obtained as a result of mathematical modeling show a gradual cooling of the foundation and embankment soils and confirm its stable frozen state during the period of operation, provided that there are no abnormal situations affecting the thermal regime (changes in soil conditions, waterlogging and swamping of the territory, destruction of the road section and other operational disruptions).

Keywords: permafrost soils, highway, embankment, temperature regime, modeling, foundations

Введение

Для районов многолетнемерзлых грунтов вопросы сохранения мерзлого состояния и несущей способности грунтовых оснований инженерных сооружений всегда имеют особую важность. Актуально это

и для автомобильных дорог как для протяженных линейных объектов, проходящих через участки различных геологических и геокриологических условий. При этом основным определяющим критерием устойчивости является стабильный температур-

ный режим с сохранением мерзлого состояния грунтовых оснований. Во избежание дальнейших проблем с эксплуатацией сооружений необходимо выполнять численное моделирование теплового режима грунтового основания и прогнозную оценку его устойчивости [1].

Для прогнозной оценки состояния грунта основания, насыпи и откосов асфальтовой автодороги в среде численного мультифизического моделирования Comsol была разработана и реализована модель системы «автодорога – грунт – атмосфера», учитываящая фазовые переходы поровой влаги, сезонные колебания температуры воздуха, изменения скорости ветра, приток тепла за счет солнечной радиации с учетом отражающей способности поверхностей, влияние сезонного снегового покрова и его про-

филь в результате регулярной очистки автодороги от снега.

Цель работы – дать прогнозную оценку состояния грунта основания асфальтовой автодороги на период ее эксплуатации в условиях многолетнемерзлых грунтов Якутии.

Материалы и методы исследования

Исследование температурного состояния грунтов оснований автодороги проводилось методами математического моделирования с решением методом конечных элементов.

Постановка математической модели переноса тепла в теле насыпи автодороги и грунтов оснований описывается уравнением теплопроводности с фазовыми переходами в спектре температур (1) с соответствующими начальным (2) и граничными условиями (3).

$$\left(C(T) + L\rho \frac{dW_{\text{HB}}(T)}{dT} \right) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad x, y \in \Omega, \quad t > 0, \quad (1)$$

$$T(x, y, 0) = T_0(y), \quad x, y \in \Omega \quad (2)$$

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{\Gamma_1} = \alpha_y \left(T_a(t) - T \Big|_{\Gamma_1} \right), \quad t > 0, \quad (3)$$

$$-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{\Gamma_2} = -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{\Gamma_3} = \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{\Gamma_4} = 0, \quad t > 0, \quad (4)$$

где $C(T)$ и $\lambda(T)$ – соответственно, объемная теплоемкость, Дж/ (м³·°C) и теплопроводность строительных материалов, насыпи и грунтов оснований, Вт/(м·°C); L – скрытая теплота фазового перехода вода-лед, Дж/кг; ρ – плотность скелета дисперсного материала, кг/м³; $W_{\text{HB}}(T)$ – функция незамерзшей воды, кг/кг; $T_0(y)$ – начальный профиль температуры по глубине массива насыпи и грунтов оснований, °C; α_y – эффективный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°C); $T_a(t)$ – температура атмосферного воздуха, °C.

Постановка такой задачи теплопроводности для промерзающих-протаивающих влажных дисперсных материалов, коими являются дорожная полотно, насыпь и грунты основания, отличается от традиционной постановки задачи Стефана [2, с. 358] тем, что вместо дельта-функции Дирака, характеризующей интенсивность фазовых переходов в объемной теплоемкости, стоит производная от функции незамерзшей воды

по температуре. Таким образом, производится «естественное сглаживание» функций теплопроводности и объемной теплоемкости влажных дисперсных материалов.

Область Ω с соответствующими границами от Γ_1 до Γ_4 , в которой отыскивается решение поставленной задачи, имеет следующий вид (рис. 1).

Как видно, входящие в уравнение теплопроводности коэффициенты представляют собой теплофизические свойства отдельных слоев, слагающих дорожное полотно, насыпь и грунты основания, которые зависят от температуры. Объемная теплоемкость в случае промерзания или протаивания становится эффективной и содержит скрытую теплоту фазового превращения воды в лед. Данная задача нелинейна из-за зависимости теплофизических свойств дисперсных грунтов от температуры и наличия фазовых переходов, происходящих в спектре температур, поэтому решение такой задачи возможно получить только численно. Для

решения нелинейной задачи теплопроводности можно применить метод конечных разностей или метод конечных элементов. Последний в данном случае будет эфек-

тивным, так как область, где отыскивается температурное поле, представляет собой сложную геометрию, при дискретизации которой получаются нерегулярные узлы.

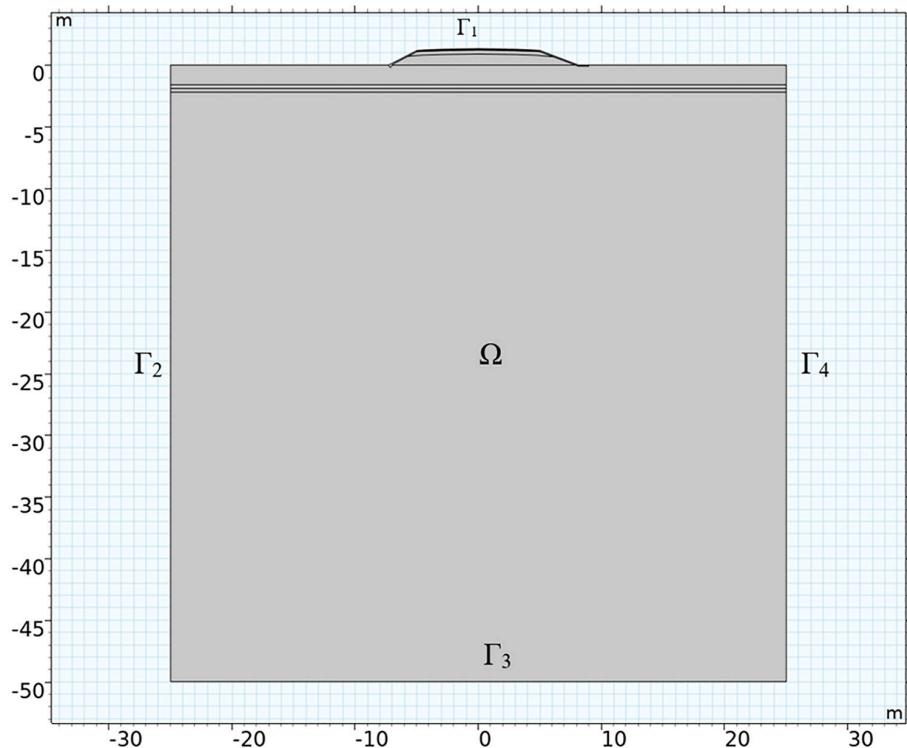


Рис. 1. Расчетная область
Примечание: сформировано авторами по результатам данного исследования

Таблица 1

Физические и теплофизические свойства материалов дорожного покрытия, насыпи и грунтов основания (г. Якутск)

Вид слоя	L , м	ρ , кг/м ³	W , д.е.	I_p , д.е.	W_p , д.е.	λ_{th} , W/(m*K)	λ_f , W/(m*K)	$C_{th} \cdot 10^6$, J/(m ³ *K)	$C_f \cdot 10^6$, J/(m ³ *K)	T_{bf} , °C
Асфальтобетон плотный	0,05	2400	-	-	-	1,4	1,4	3,12	3,12	-
Асфальтобетон пористый	0,07	2300	-	-	-	1,25	1,25	3,22	3,22	-
Щебень	0,31	1800	0,05	-	-	1,39	1,48	2,4	2,22	0,0
Грунт земляного полотна (песок средней крупности)	0,9	1550	0,22	-	-	2,14	2,38	2,85	2,15	-0,6
Суглинок легкий пылеватый, засоленный	1,6	1370	0,31	0,09	0,25	1,48	1,59	3,07	2,2	-1,0
Песок мелкий, засоленный	0,6	1460	0,25	-	-	2,09	2,32	2,87	2,14	-0,5 (-0,24)
Песок средней крупности	11,9	1520	0,23	-	-	2,13	2,37	2,86	2,15	-0,12

Примечание: составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследования, а также источника [5].

Поставленная задача решалась методом конечных элементов в программе COMSOL Multiphysics. Выбор этого программного пакета обусловлен его широкими возможностями, в первую очередь гибкостью задания вида уравнения переноса тепла, граничных условий, возможностью настройки и реализации различного уровня сложности математических функций, а также задания пользователем своих уравнений или их систем. Сравнение COMSOL Multiphysics с альтернативными программными приложениями для моделирования методом конечных элементов показывает, что оно ни в чем им не уступает, и более того, обладает определенными преимуществами [3; 4].

Теплофизические свойства слоев, слагающих дорожное полотно, насыпь и грунты основания, определялись по справочным таблицам для строительных материалов и из СП 25.13330.2020 «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах» [5]. В этом своде правил приводятся формулы для определения температуры начала замерзания грунтов, расчета засоленности, объемных теплоемкостей в талом и мерзлом состояниях, а также таблицы и формулы для теплопроводностей в этих же состояниях. Для учета фазовых превращений поровой воды в лед и обратно в этом же своде имеются таблицы и формула для расчета количества незамерзшей воды. При построении функции незамерзшей воды на основе расчетных значений количества незамерзшей воды от температуры применялась аппроксимация, предложенная в работе [6, с. 18; 7, с. 41]. Основные данные по структуре грунта для модели взяты из таблиц инженерных изысканий и приведены в таблице 1.

В граничное условие (3) теплообмена с атмосферным воздухом входит темпера-

тура воздуха в зависимости от времени. Данная величина должна иметь поправку на температуру за счет воздействия солнечной радиации. Оценка среднемесячной температуры поверхности дорожной насыпи производилась с привлечением нормативных документов СП 498.1325800.2020 «Основания и фундаменты зданий и сооружений на многолетнемерзлых грунтах. Требование к инженерной подготовке территории» [8] и СП 447.1325800.2019 «Железные дороги в районах вечной мерзлоты» [9]. Для естественной поверхности грунта воздействие солнечной радиации согласно [9], п. 7, приложение А

$$T(t) = T_a(t) + \Delta T_r + \Delta T_e, \quad (5)$$

где $T_a(t)$ – среднемесячная температура атмосферного воздуха, приведенная в таблице 2, ΔT_r и ΔT_e – поправки на теплообмен за счет солнечной радиации и испарения, $^{\circ}\text{C}$.

$$\Delta T_r = \frac{R(t)}{\alpha}, \quad \Delta T_e = k \cdot T_r, \quad (6)$$

где α – коэффициент теплообмена, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$; $R(t)$ – радиационный баланс различных поверхностей, $\text{Вт}/\text{м}^2$; k – коэффициент, учитывающий характер поверхности. В первом приближении равный для естественной поверхности – 0,8, а для оголенной – 0,3.

Для определения коэффициента теплообмена в зависимости от скорости ветра использовалась широко применяемая формула Юргенса [10; 11]:

$$\alpha = \begin{cases} 6.16 + 4.19v, & 0 \leq v \leq 5 \\ 7.56v^{0.78}, & v > 5 \end{cases} \quad (7)$$

Радиационный баланс для различных поверхностей регламентируется в п. 5.2.13 СП 498.1325800.2020 [12].

Таблица 2

Климат (среднемесячные значения температуры воздуха, скорости ветра и солнечной радиации) (г. Якутск)

Параметр	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь
$T_a, ^{\circ}\text{C}$	-39,1	-34,6	-20,3	-4,7	7,5	16,2
$v, \text{м/с}$	1,1	1,1	1,7	2,6	3,1	2,9
$Q_c, \text{Вт}/\text{м}^2$	12,69	47,12	122,83	196,37	220,65	253,86
Параметр	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
$T_a, ^{\circ}\text{C}$	19,3	15,2	5,9	-7,8	-27,8	-37,8
$v, \text{м/с}$	2,6	2,5	2,4	2,2	1,6	1,1
$Q_c, \text{Вт}/\text{м}^2$	234,09	175,10	109,18	52,64	20,83	6,72

Примечание: составлено авторами на основе источника [12].

Таблица 3

Высота и средняя плотность снежного покрова (г. Якутск)

Параметр	Октябрь			Ноябрь			Декабрь			Январь		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
H_s , м	0,01	0,05	0,08	0,10	0,19	0,19	0,19	0,22	0,24	0,24	0,24	0,24
ρ_s , г/см ³	0,08	0,10	0,12	0,12	0,12	0,14	0,15	0,15	0,15	0,16	0,16	0,16
Параметр	Февраль			Март			Апрель					
	1	2	3	1	2	3	1	2	3			
H_s , м	0,25	0,25	0,25	0,26	0,24	0,24	0,18	0,06	—			
ρ_s , г/см ³	0,16	0,17	0,18	0,18	0,19	0,19	0,22	0,20	—			

Примечание: составлено авторами на основе источника [12].

Таблица 4

Полевые данные замеров температур по глубине (15 мая 2023 г.)

z , м	1	2	3	4	5	6	7
T_0 , °C	-0.2	-0.3	-0.4	-0.6	-0.6	-0.8	-0.8
z , м	8	9	10	11	12	13	14
T_0 , °C	-0.9	-1.0	-1.1	-1.1	-1.2	-1.1	-1.2

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

Так, для песчаных, щебеночных и асфальтовых поверхностей $R(t)$ определяется по формуле:

$$R(t) = 0,61Q_c(t) - 20, \quad (8)$$

а для бетонных и железобетонных поверхностей:

$$R(t) = 0,61Q_c(t) - 40, \quad (9)$$

где $Q_c(t)$ – суммарная солнечная радиация, приведенная в таблице 2 и определяемая согласно документу СП 131.13330 «Строительная климатология» [12].

В модели предполагается, что поверхность асфальта в зимний период не имеет снежного покрова, поэтому температурные поправки учитываются на все месяцы, остальные поверхности, такие как естественный грунт и оба откоса дорожной насыпи, поправки на температуру воздуха, учитываются только с мая по октябрь.

Коэффициент теплопередачи от холодного воздуха к поверхности снежного покрова через его толщу к поверхности грунта или поверхности насыпи, как в работах [13; 14], определяется по формуле:

$$\alpha_y = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha} + \frac{h_s}{\lambda_s} \right)}, \quad (10)$$

где h_s – высота снежного покрова, приведенная в таблице 3 и определяемая по данным

ближайшей станции по метеонаблюдениям, m ; λ_s – теплопроводность снега, Вт/(м·°C).

Теплопроводность снежного покрова рассчитывалась по формуле, предложенной Б.В. Проскуряковым [15]:

$$\lambda_s = 0,02093 + 1,01_s, \quad (11)$$

где s – плотность снега, значения приводятся в таблице 3.

Замеры начального профиля температур слоев грунтового массива проводятся изыскательской организацией. Для этого проводится обустройство температурной скважины глубиной до 15 м, путем бурения и далее установки термопары с размещением в ней термокос из датчиков температур (логгеров). Замер температур по глубине проводится с шагом в 1 метр. Данные по начальному распределению температуры по глубине массива приведены в таблице 4.

Результаты исследования и их обсуждение

В результате численного моделирования получены прогнозные значения температур автодорожного полотна насыпи и грунтов оснований за счет теплообмена с наружным атмосферным воздухом для различных моментов времени.

Распределение температур по глубине массива в начальный момент времени (рис. 2) имело растянутый характер из-за возведения насыпи в зимний период.

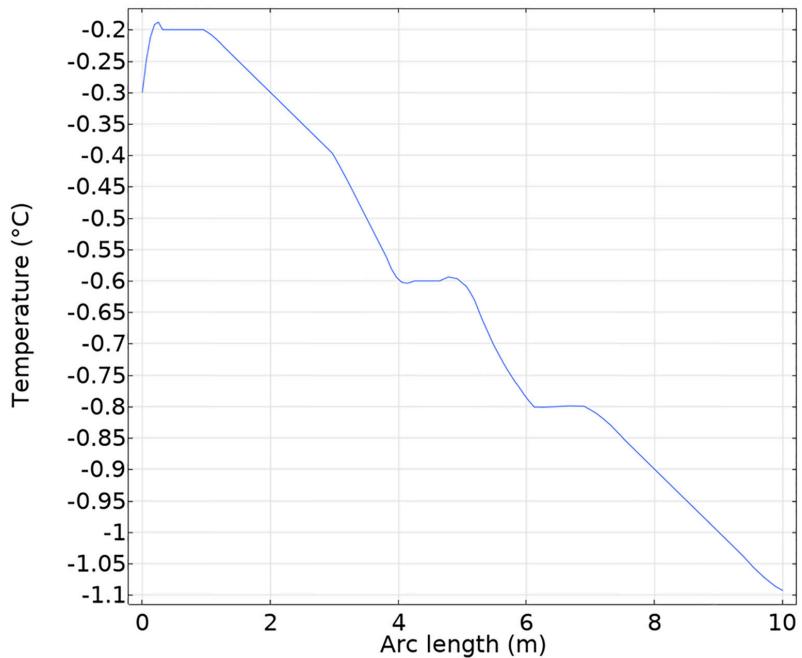


Рис. 2. Профиль распределения температуры по глубине на начальный момент времени (15.05.2023 г.)
Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования

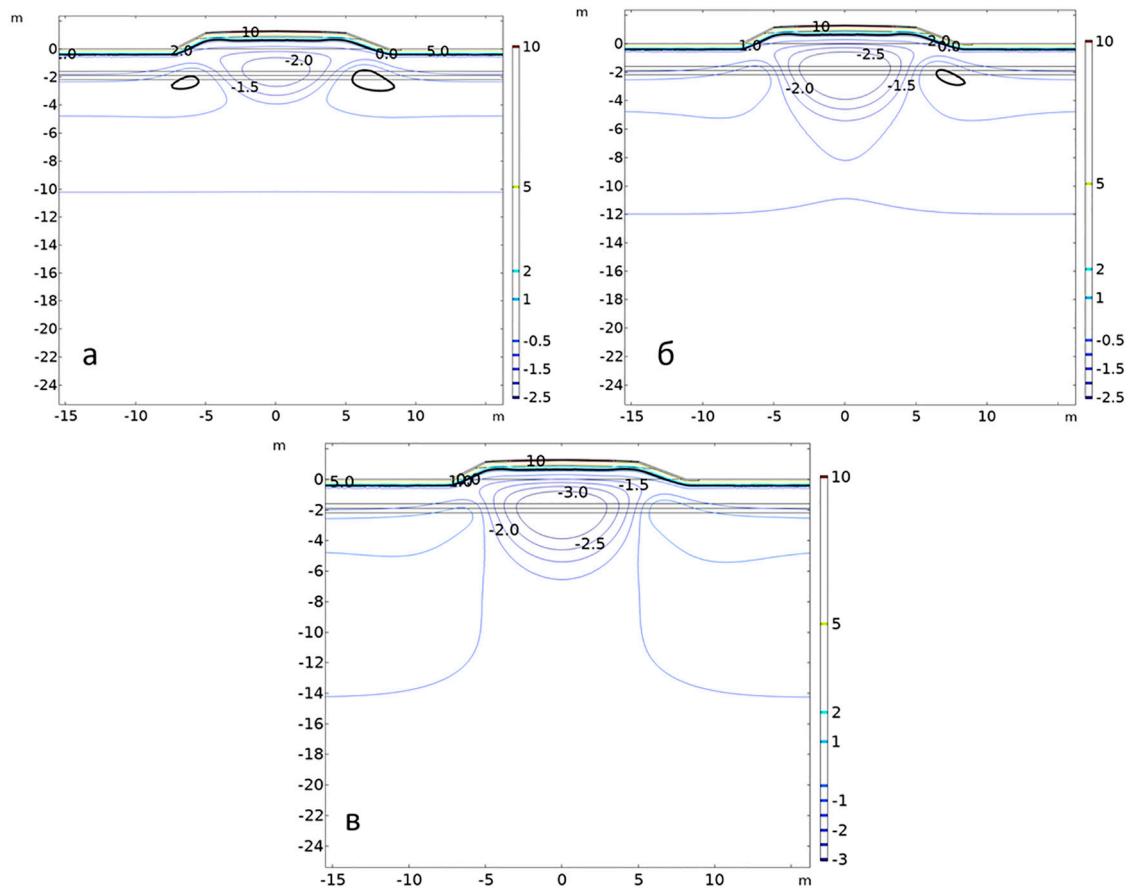


Рис. 3. Конфигурации изотерм: а) через 2 года; б) через 5 лет; в) через 10 лет
Жирной черной линией обозначены нулевые изотермы
Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования

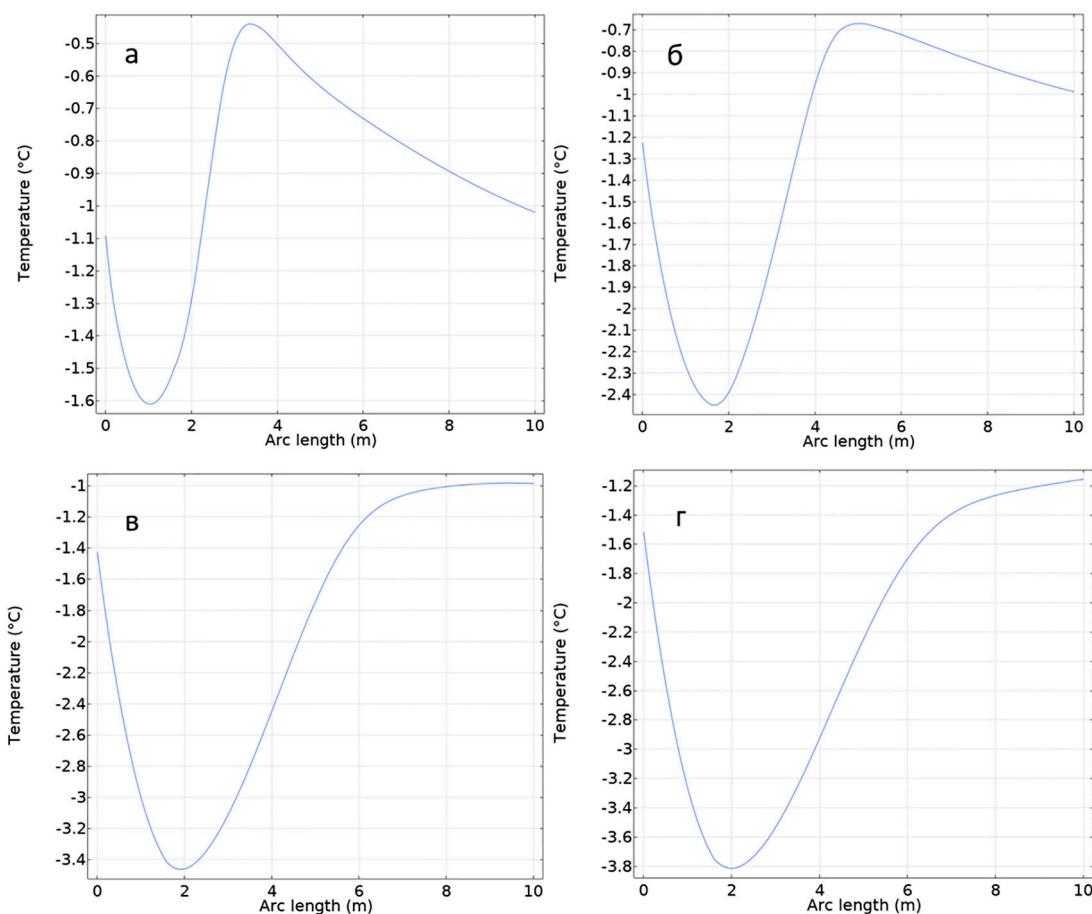


Рис. 4. Профили распределения температуры по глубине:
а) через 1 год; б) через 2 года; в) через 5 лет; г) через 10 лет
Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования

Анализ полученных изотерм (рис. 3) показывает, что после первого расчетного года формируется ядро промерзания под насыпью с постепенным понижением температур в последующие годы.

Характер распределения температур по глубине массива, начиная с первого расчетного года, изменяется в сторону отрицательных значений (рис. 4).

Температура на глубине нулевых амплитуд (10 м) в начале расчетов немного повышается, за первые три года достигая $-0,96^{\circ}\text{C}$, а затем в последующие годы уменьшается, доходя до значения $-1,15^{\circ}\text{C}$ на десятом году. Повышение температуры на начальном периоде объясняется отложенным влиянием растепления верхних слоев грунта в процессе строительных работ.

Все графики распределения температур представлены для середины мая, т.к. исходная точка моделирования – 15 мая 2023 года. При этом минимум температуры в середине

мая смещается с глубины 1 метр со значением $-1,6^{\circ}\text{C}$ в первый год на глубину 2 метра со значением $-3,8^{\circ}\text{C}$ через 10 лет.

Полученный характер изменения температурного режима грунта после строительства автодороги с понижением значений температуры – следствие изменения профиля грунта с обустройством насыпи, а также регулярной расчистки с поверхности автодороги снегового покрова, имеющего теплоизолирующие свойства для подстилающих поверхностей.

Заключение

В результате проведенного исследования разработана и реализована математическая модель, позволяющая осуществлять прогнозный расчет температурного режима автодороги с учетом фазовых переходов поровой влаги, сезонных колебаний температуры воздуха, изменения скорости ветра, притока тепла к поверхности за счет

солнечной радиации с учетом отражающей способности поверхностей, влияния сезонного снегового покрова и его профиля в результате регулярной очистки автодороги от снега.

Результаты проведенного численного моделирования дают прогнозную оценку на постепенное охлаждение и стабильное мерзлое состояние грунтового основания и насыпи автомобильной дороги на период эксплуатации в 10 лет при условии отсутствия влияющих на тепловой режим нештатных ситуаций (изменение грунтовых условий, переувлажнение и заболачивание территории, разрушение участка автодороги и прочие нарушения эксплуатации).

Список литературы

1. Степанов С.П., Цеева А.Н., Васильев В.И., Сирдит И.К. Математическое моделирование температурного режима грунтов оснований фундаментов в условиях многолетнемерзлых пород // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2017. № 1. С. 142–159. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28376474> (дата обращения: 08.09.2025). DOI: 10.18698/1812-3368-2017-1-142-159.
2. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача. Изд. 2-е. М.: ЛИБРОКОМ, 2009. 782 с. URL: <https://elibrary.ru/QJVMAV> (дата обращения: 08.09.2025). ISBN: 978-5-397-00761-0.
3. Шабанов А.С., Нейман В.Ю. Применение пакетов программ FEMM и COMSOL Multiphysics в задачах расчета линейных электромагнитных двигателей // Современные материалы, техника и технологии. 2017. № 5 (13). С. 96-100. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30363053> (дата обращения: 08.09.2025).
4. Токтаров Д.Д., Ильясова З.А., Березовская И.Э., Габитова З.Х. Компьютерное моделирование для изучения физических процессов // Universum: технические науки. 2022. № 4-1 (97). С. 64-68. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48507421> (дата обращения: 08.09.2025).
5. СП 25.13330.2020 «СНиП 2.02.04-88 Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах». Дата принятия: 30.12.2020 [Электронный ресурс] URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/117292/> (дата обращения: 08.09.2025).
6. Пермяков П.П. Идентификация параметров математической модели тепловлагопереноса в мерзлых грунтах. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1989. 86 с. URL: <https://ntrs.ru/open/7237> (дата обращения: 08.09.2025) ISBN: 5-02-029664-3.
7. Пермяков П.П. Математическое моделирование негативных мерзлотных процессов / Отв. ред. И.И. Рожин. Новосибирск: СО РАН, 2023. 160 с. <https://ntrs.ru/open/105982> (дата обращения: 08.09.2025). ISBN: 978-5-6048539-7-2.
8. СП 498.1325800.2020 «Основания и фундаменты зданий и сооружений на многолетнемерзлых грунтах. Требования к инженерной подготовке территории» Дата принятия: 30.12.2020 [Электронный ресурс] URL: <https://minstroyrf.gov.ru/docs/120037/> (дата обращения: 08.09.2025).
9. СП 447.1325800.2019 «Железные дороги в районах вечной мерзлоты. Основные положения проектирования» Дата принятия: 04.02.2019 [Электронный ресурс]. URL: <https://minstroyrf.gov.ru/docs/18767/> (дата обращения: 08.09.2025).
10. Хохолов Ю.А., Курилко А.С., Киселев В.В., Соловьев Д.Е. Математическое моделирование формирования искусственного ледяного массива методом факельного намораживания на дне отработанного карьера криолитозоны // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. 2022. Т. 9. № 2. С. 53-60. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54799238> (дата обращения: 08.09.2025). DOI: 10.15372/FPVGN2022090208.
11. Грибовский Г.В. Шупляков М.Ю. Обзор методик по определению коэффициента теплообмена для различных поверхностей в условиях // Мониторинг в криолитозоне: Сборник докладов Шестой конференции геокриологов России с участием российских и зарубежных ученых, инженеров и специалистов, Москва, 14–17 июня 2022 года / Под ред. Р.Г. Мотенко. М.: «КДУ», «Добросвет», 2022. С. 595–599. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49415774&selid=49415882> (дата обращения: 08.09.2025). DOI: 10.31453/kdu.ru.978-5-7913-1231-0-2022-1130.
12. СП 131.13330.2020 «СНиП 23-01-99 Строительная климатология». Дата принятия: 20.12.2020 [Электронный ресурс] URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/upload/iblock/82b/SP-131.pdf> (дата обращения: 08.09.2025).
13. Семенова Н.П., Малышев А.В., Тимофеев А.М., Большев К.Н. Математическая модель температурного режима в основании здания с плитным фундаментом на уплотненном трамбованием сезоннооттаивающим слое // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2023. № 4. С. 34-39. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54896350> (дата обращения: 08.09.2025). DOI: 10.1007/s11204-023-09906-y.
14. Малышев А.В., Васильев С.С., Пермяков П.П., Большев К.Н. Моделирование теплового взаимодействия системы трубопроводов центрального хладоснабжения с мерзлым грунтом // Успехи современного естествознания. 2022. № 12. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50089421> (дата обращения: 08.09.2025). DOI: 10.17513/use.37966.
15. Осокин Н.И., Сосновский А.В., Чернов Р.А. Коэффициент теплопроводности снега и его изменчивость // Криосфера Земли. 2017. Т. 21. № 3. С. 60-68. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29234635> (дата обращения: 08.09.2025). DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-3(60-68).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

УДК 550.837:551.34(571.56)
DOI 10.17513/use.38455

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ КОМПЛЕКСНОГО ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДОЧНЫХ МЕТОДОВ ПРИ ВЫЯВЛЕНИИ ТАЛИКА В МАССИВЕ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ

¹Саввинов И.И., ²Куляндин Г.А.

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

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

Основной целью геофизических исследований, представленных в данной статье, является комплексный анализ и интерпретация результатов электроразведочных методов при исследованиях криолитозоны. Для оценки возможностей отдельных методов электроразведки при исследовании геокриологических свойств горных пород авторами выбран участок с известными параметрами криогенного состояния, включающий наличие линзы льда, а также локальной таликовой зоны. Геофизические измерения проведены электротомографией методом сопротивлений и вызванной поляризации, бесконтактным измерением электрического поля, георадиолокационным зондированием и методом естественного электрического поля. Полевые работы выполнены осенью при максимальной оттайке слоя сезонного промерзания и оттаивания. По результатам геофизических работ построены геоэлектрические разрезы значений удельного электрического сопротивления и вызванной поляризации, георадиолокационный разрез и кривая потенциала естественного электрического поля. Отмечено, что зоны преимущественно с низкими значениями удельного электрического сопротивления в 10–300 Ом·м и с высокими значениями поляризации (9–15%) соответствуют талым породам, со значениями электросопротивления 300–1000 Ом·м при поляризации 5–9% – пластично-мерзлым, а с высокими значениями сопротивлений, превышающими 1000 Ом·м, и низкими значениями вызванной поляризации (до 5%) относятся к мерзлым, различной степени мерзлоты и льдосодержания. Комплексный анализ данных электроразведочных исследований показал хорошую взаимозависимость разных электрофизических свойств горных пород при оценке их криогенного состояния. Полученные результаты электроразведочных методов показали высокую эффективность комплексного анализа для выявления в горных породах зон различного криогенного состояния массива.

Ключевые слова: линза льда, криолитозона, талик, электроразведка, электротомография, георадиолокация, бесконтактное измерение электрического поля, естественное электрическое поле

ASSESSMENT OF THE CAPABILITIES OF INTEGRATED ELECTRICAL PROSPECTING METHODS FOR DETECTING TALIKS IN PERMAFROST MASSIFS OF CENTRAL YAKUTIA

¹Savvinov I.I., ²Kulyandin G.A.

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

The main objective of the geophysical studies presented in this article is a comprehensive analysis and interpretation of the results of electrical prospecting methods applied in cryolithozone research. To assess the capabilities of individual electrical methods for studying the geocryological properties of rocks, the authors selected a site with well-known parameters of the cryogenic state, including the presence of an ice lens and a local talik zone. Geophysical measurements were carried out using electrical resistivity tomography and induced polarization, non-contact electric field measurements, ground-penetrating radar, and the natural electric field method. Fieldwork was conducted in the autumn period, when the seasonally frozen layer reached its maximum thaw depth. Based on the results of geophysical investigations, geoelectric sections of electrical resistivity and induced polarization values were constructed, along with a ground-penetrating radar profile and a natural electric field potential curve. It was found that zones with predominantly low resistivity values of 10–300 ohm·m and high polarization values (9–15%) correspond to thawed rocks; resistivity values of 300–1000 ohm·m with polarization values of 5–9% correspond to plastic-frozen rocks; and high resistivity values exceeding 1000 ohm·m with low polarization (up to 5%) correspond to frozen rocks with varying degrees of freezing and ice content. A comprehensive analysis of the electrical prospecting data revealed a strong correlation between different electrical properties of the rocks in assessing their cryogenic state. The results demonstrate the high effectiveness of the integrated geophysical approach for identifying zones of various cryogenic states within the rock mass.

Keywords: ice lens, cryolithozone, talik, electrical exploration, electrotomography, ground penetrating radar (GPR) method, contactless measurement of electric field, natural electric field

Введение

Многолетняя мерзлота – явление, в котором фактор времени имеет решающее значение. Границы распространения мерзлоты в естественных природных условиях и ее температурный режим непрерывно меняются. Особое внимание уделяется слою сезонного промерзания и оттаивания. Изучение криогенного состояния горных пород является важной составляющей в инженерно-геологических изысканиях при строительстве и эксплуатации инженерно-технических объектов, горнотехнических и гидротехнических сооружений [1–3]. Качественная оценка геокриологической обстановки объектов исследований дает возможность правильно определить наличие, характер и пределы распространения многолетней мерзлоты, выявить опасные процессы (например, криогенное выветривание, термокарст, мерзлотные трещины) и условия формирования рельефа и грунтов. Это позволяет принимать обоснованные решения по проектированию, строительству и эксплуатации объектов в условиях низких температур, что минимизирует риски и затраты, связанные с мерзлотными явлениями.

При определении формы и мощности многолетнемерзлых пород методы электроразведки успешно применяются в практике и обладают высокой эффективностью [4–6]. Это объясняется существенным различием электрофизических свойств мерзлых и талых пород, в первую очередь по удельному электрическому сопротивлению. Как известно, талые породы по результатам электроразведки методами сопротивлений выделяются низкими значениями удельного электрического сопротивления (УЭС) (ниже 300 Ом·м) и обладают хорошей проводимостью, тогда как мерзлые – значительно высокими (1000 Ом·м и более) [7]. Наличие низкопроводящих мерзлых пород и льдов при проведении электроразведки на постоянном токе уменьшает глубину исследований и делает невозможным определение мощности мерзлых пород. Вызванная поляризация (ВП) грунтов в различном криогенном состоянии также отличается. Многолетнемерзлые породы имеют низкие значения ВП – менее 5 %, а таликовые – 9–12 %, что дает возможность использования метода вызванной поляризации для геокриологического мониторинга [8]. Диэлектрическая проницаемость грунта зависит от пористости, влажности и в меньшей степени от минерального состава горных пород и составляет, например, для воды – 81, а для льда –

4 [9, с. 94]. Для изучения этого параметра используется метод высокочастотной электроразведки – георадиолокация [9, с. 88]. Также в качестве дополнительной информации для комплексного анализа возможно использование данных о естественном электрическом поле.

Цель исследования – комплексный анализ и интерпретация результатов электроразведочных методов, таких как электротомография методом сопротивлений и вызванной поляризации, бесконтактное измерение электрического поля, георадиолокация и метод естественного электрического поля, использованных при исследованиях криогенного состояния массива горных пород в Центральной Якутии.

Материалы и методы исследования

Для оценки возможностей отдельных методов электроразведки при исследовании геокриологических свойств грунтов авторами выбран участок с известными параметрами криогенного состояния, включающий наличие линзы льда, а также локальной таликовой зоны. Объект исследований расположен в окрестностях Якутска и представляет собой склон с заболоченным участком в низине (рис. 1).

Юго-восточная часть профиля представлена заболоченным рельефом с тонким слоем мха, под которым зафиксировано наличие линзы льда. Далее по профилю идет постепенное возвышение, где верхняя часть земной поверхности характеризуется слоем сухих песков. В центральной части профиля наблюдаются более влажные грунты, также с наличием тонкого слоя мха. Северо-западная сторона представлена мерзлыми породами различной степени льдистости.

Электротомография методами сопротивлений и вызванной поляризации [10] является основным эффективным инструментом для изучения криогенного состояния грунтов, но тем не менее обладает некоторыми недостатками. Современные многоэлектродные станции требуют качественного гальванического заземления электродов с переходным сопротивлением, не превышающим 10 кОм. Это указывает на то, что больше половины года в Якутии, когда верхняя часть земной поверхности в мерзлом состоянии, проведение электротомографии невозможно. Следует учитывать и наличие, например, на территориях капитального строительства асфальтобетонного покрытия, что также ограничивает проведение электротомографии.

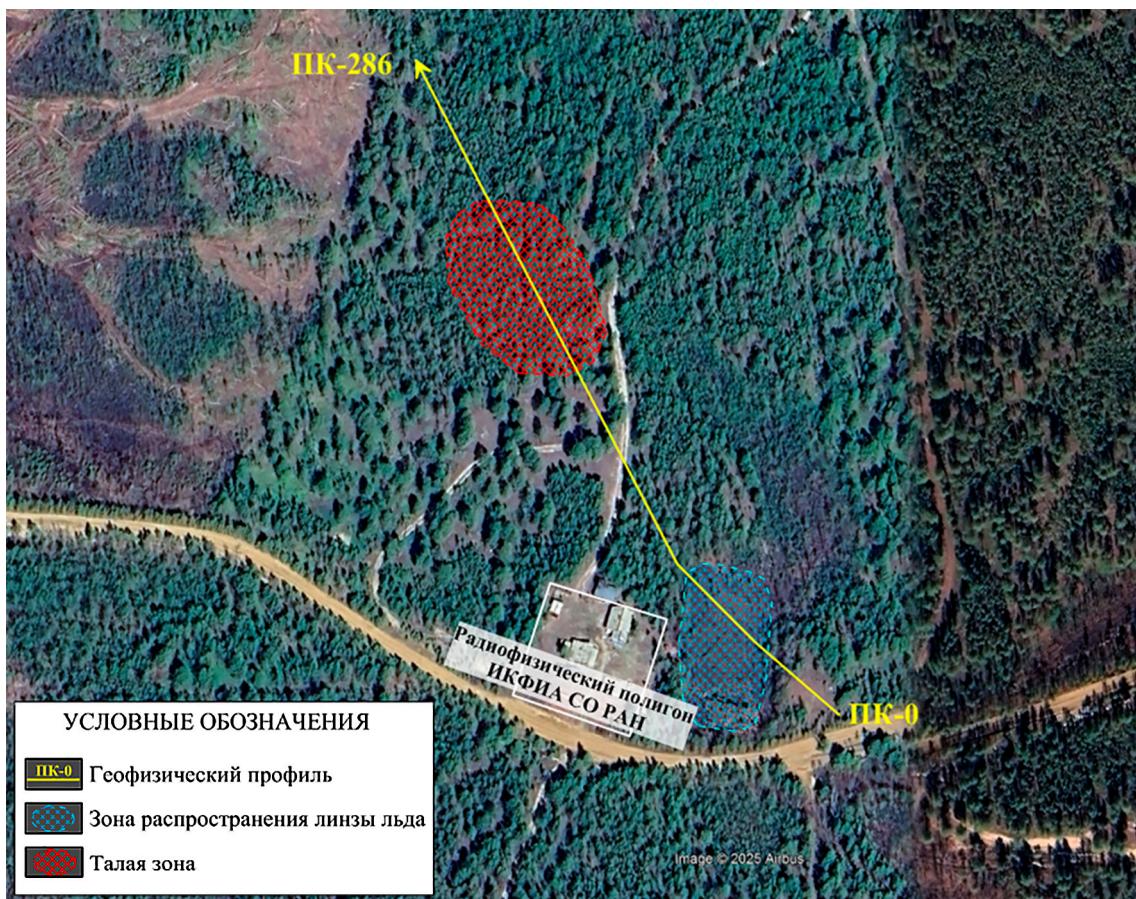


Рис. 1. Схема геофизического профиля
Примечание: составлен авторами на основе аэрофотоснимка
Google Earth и по результатам данного исследования

Еще одним немаловажным недостатком является наличие металлических объектов на территориях исследований (подземные трубы, армированный бетон, сваи и другие металлические конструкции), что отразится на результатах ложными низкоомными аномалиями [11].

При проведении электротомографии методом сопротивлений использована 48-электродная 12-канальная станция «Скала-48к12» (ООО «КБ Электрометрии») с трехэлектродной установкой «поль-ди-поль» с шагом 2 м. Использование прямых и обратных трехэлектродных установок обеспечивает наибольшую глубинность и качество получаемого материала [12].

Бесконтактное измерение электрического поля (БИЭП) в отличие от электротомографии возможно применять на местах, где заземление электродов осложнено или невозможно [13]. Например, в зимний период при наличии сезонно-мерзлого слоя, на территориях с асфальтобетонным по-

крытием или в горных районах. При проведении работ методом БИЭП использована аппаратура «БИКС» (АО «СКБ сейсмического приборостроения») с дипольной осевой установкой с приемным и питающим диполями одинаковой длины.

Георадиолокационное зондирование [10, с. 88] основано на изучении криогенного состояния грунтов с помощью высокочастотных импульсных электромагнитных волн. Граница между сезонно-талым слоем и кровлей многолетнемерзлых пород на радарограммах отражается высоким контрастом, что дает высокую эффективность использования георадиолокации при исследованиях криолитозоны [14]. Основными недостатками метода являются его малая глубинность (до 15 м) и невозможность получить качественные материалы при наличии глинистых пород. Для проведения работ методом георадиолокации использовался георадар «ОКО-3» (ООО «Логические системы») с антенным блоком 100 МГц.

Основной задачей метода *естественного электрического поля (ЕП)* является выявление зон фильтрации подземных вод, например, при исследованиях состояния плотин гидротехнических сооружений, а также разведке месторождений рудных полезных ископаемых. В данной работе метод ЕП проведен способом градиента и использовался в качестве дополнительной информации для обобщенного анализа результатов комплексирования [15]. В качестве измерителя использовался цифровой мультиметр марки «ANENG» с неполяризующимися электродами шагом 10 м.

Результаты исследования и их обсуждение

Полевые работы комплексом электроразведочных методов выполнены осенью при максимальной оттайке слоя сезонного промерзания и оттаивания. По результатам выполненных работ построены геоэлектрические разрезы методом сопротивлений и вызванной поляризации, георадиолокационный разрез и кривая потенциала естественного электрического поля (рис. 2). Процедуры обработки и инверсии данных электротомографии методом сопротивлений и вызванной поляризации, а также бесконтактного измерения электрического поля выполнены в ПО x2ipi (МГУ, А.А. Бобачев) и zondres2d (А.Е. Каминский), с последующим экспортом в формат ПО Golden Software Surfer.

По результатам электротомографии методом сопротивлений и вызванной поляризации построены геоэлектрические разрезы с учетом изменения рельефа местности (рис. 2, А и Б). Максимальная глубина разреза достигнута в пределах 30–35 м. Как ранее было описано, области с относительно низкими значениями УЭС в 10–300 Ом·м с высокими значениями ВП (9–15%) соответствуют талым породам, 300–1000 Ом·м (5–9% ВП) – пластично-мерзлым, а с высокими значениями УЭС, превышающими 1000 Ом·м, и низкими ВП (до 5%) относятся к мерзлым, различной степени мерзлоты и льдосодержания [7–8].

Юго-восточная часть профиля на геоэлектрическом разрезе характеризуется высокими значениями УЭС (более 2000 Ом·м) и низкой ВП (менее 1%), что подтверждает наличие линзы льда в интервале профиля 0–78 м. Далее по профилю в интервале 80–165 м наблюдается значительное понижение УЭС (300–1000 Ом·м) в верхней части разреза, что связано с залеганием сухих песков.

Средняя мощность данного слоя составляет 4 м. Глубже по разрезу зафиксирована низкоомная аномальная зона (менее 300 Ом·м) с высокими значениями ВП около 12%, связанная с наличием талых горных пород. В интервале профиля от 165–210 м наблюдаются низкие значения УЭС (менее 200 Ом·м) по всей глубине разреза с высокими значениями ВП (более 12%), что характерно для локальной таликовой зоны. Северо-западная часть профиля представлена высокими значениями УЭС (1000 Ом·м и более) и связана с наличием в верхней части разреза мерзлых пород средней мощностью 10 м.

Геоэлектрический разрез, полученный в результате бесконтактного измерения электрического поля (рис. 2, В), полностью повторяет результаты электротомографии методом сопротивлений. Максимальная глубина исследований по разрезу составила 13,5 м.

По данным георадиолокации построен георадиолокационный разрез с учетом изменения рельефа местности (рис. 2, Г). На отрезке, ориентировано со 130 до 190 м, на радарограмме присутствуют сигналы-помехи от экранированных кабелей передачи данных. Электрофизические характеристики горных пород на месте исследований связаны со значениями вещественной части диэлектрической проницаемости. По ней определяется глубина зондирований на конкретном участке. Для данной местности средние значения диэлектрической проницаемости определены по волнам дифракции, образованным при отражениях от локальных неоднородностей в толще горных пород. На участке радарограммы выявлена гипербола, по которой с помощью соответствующей процедуры в ПО GeoScan32, путем наложения теоретической гиперболы, определено значение вещественной части диэлектрической проницаемости – 12. По разрезу прослежена граница сезонно-талого слоя на глубинах до 2,8 м. Граница этого слоя на волновой картине выделяется по протяженным оси синфазности, состоящим из последовательности высокоамплитудных сигналов одной фазы. Высокие значения амплитуд на границе талых и мерзлых пород связаны с контрастом в значениях вещественной части диэлектрических проницаемостей: низких значений для мерзлых и высоких – для талых, увлажненных. Увлажнение происходит на границе сезонно-талого слоя в результате накопления влаги от осадков на водоупоре, который образован мерзлыми породами [16].

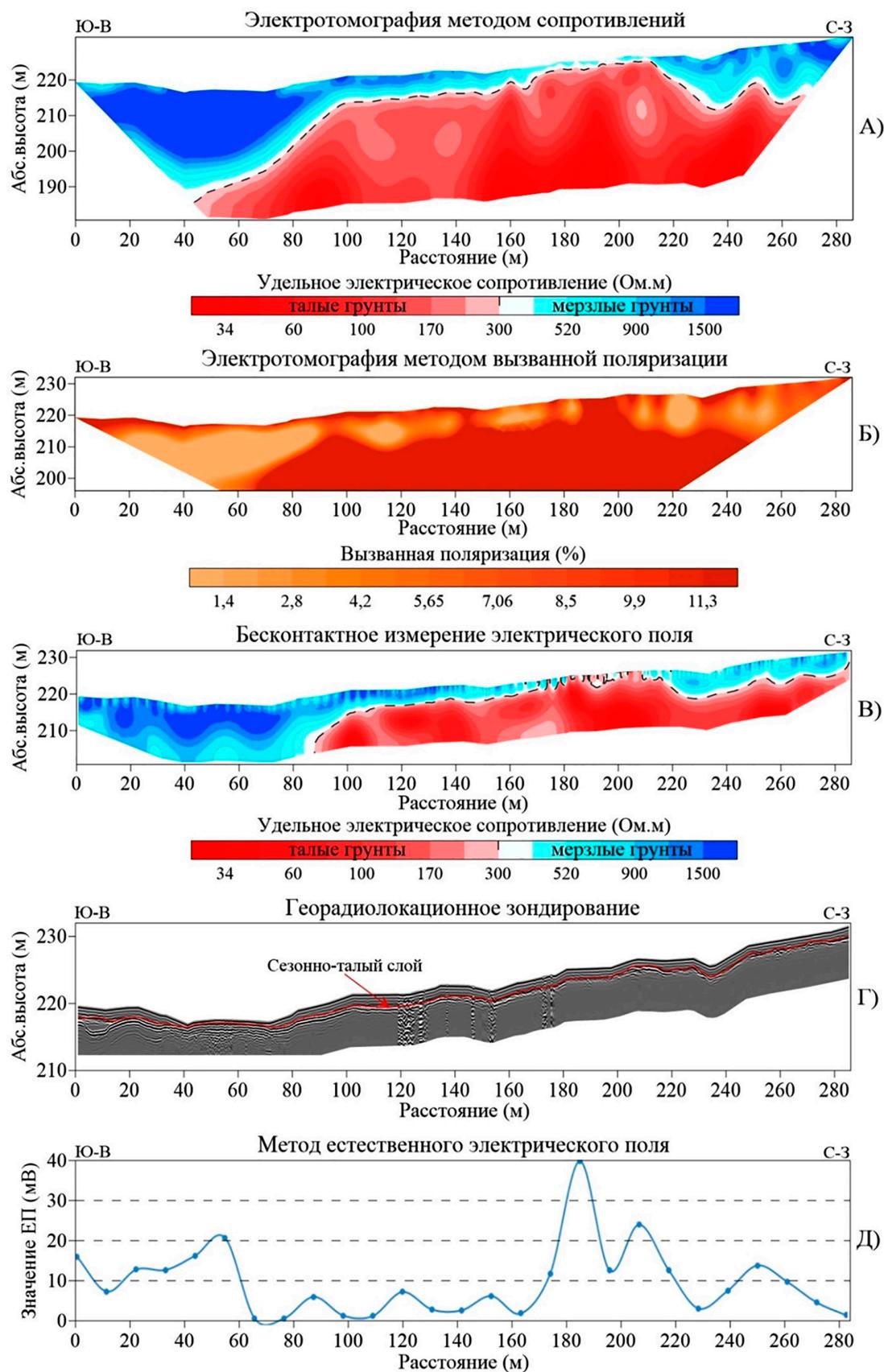


Рис. 2. Результаты геофизических исследований
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

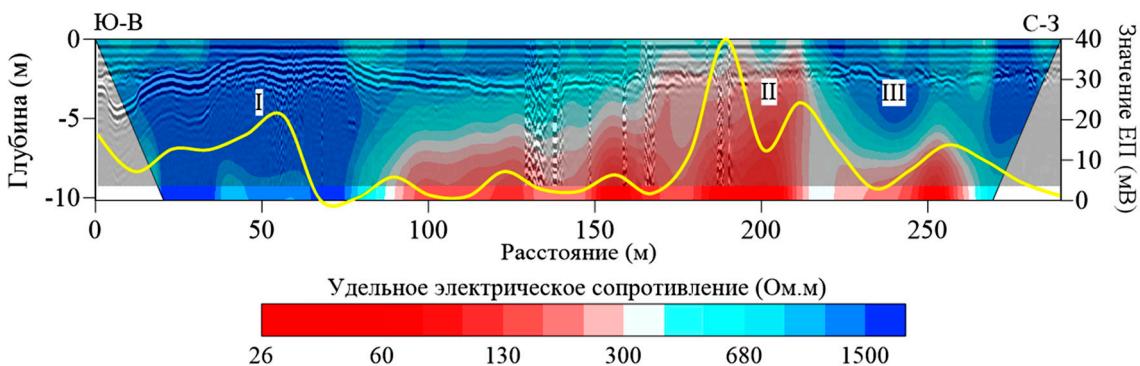


Рис. 3. Сопоставление результатов электротомографии методом сопротивлений, георадиолокационного зондирования и метода естественного поля

Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Особенно контрастно прослеживается эта граница на участке болотистой местности (33–80 м), где под небольшим слоем мха залегает пластовый лед. Такие же контрастные оси синфазности, но с меньшей кратностью прослеживаются на отрезках 0–33 и 80–98 м – по краям от болота, что может быть связано с высокой льдистостью пород в отражающем слое. С началом подъема на возвышенность на отметке 150 м граница сезонно-талого слоя выделяется в основном по прерывистым осям синфазности с переменной контрастностью, так как отражения местами становятся слабыми или вовсе пропадают, что можно интерпретировать как отсутствие резко изменяющихся свойств горных пород с глубиной.

По результатам измерений методом естественного электрического поля получена кривая потенциалов ЕП (рис. 2, Д). Интервал профиля 0–60, где зафиксировано наличие льда под тонким слоем мха с определенной влажностью, характеризуется значениями потенциалов от 7,5 до 20 мВ. Далее по профилю в интервале профиля 60–170 в зоне сухих песков фиксируются значения потенциалов близких к нулю с незначительными изменениями (0,8–6,2 мВ). Таликовая зона, отражающаяся на геоэлектрических и георадиолокационных разрезах по данным ЕП выделяется высокими значениями потенциалов (от 12,8 до 40 мВ). Северо-западная часть профиля, где по данным электротомографии методом сопротивлений выявлена высокоомная зона мерзлых пород, характеризуется значениями потенциалов от 1,6 до 14 мВ, что аналогично юго-восточной части.

При комплексном анализе полученных материалов проведено сопоставление результатов электроразведочных методов. Как

можно наблюдать на рис. 3, болотистый участок (33–80 м) и прилегающая к нему территория (0–33 и 80–98 м) характеризуются приведенными выше описаниями по каждому методу и соответствуют мерзлому массиву пород (зона I) на всю исследуемую глубину. Мерзлый массив на возвышенности (220–280 м) отличается прерывистыми отражениями от сезонно-талого слоя по данным георадиолокации и различными зонами УЭС в диапазоне 400–1500 Ом·м по данным электротомографии (зона II). Предположительно, на этом участке сезонное накопление влаги происходит неравномерно из-за склона и растительности, что в дальнейшем приводит к изменению электрофизических свойств под влиянием талика внутри массива, в окрестности пикета 250. Таликовая зона III (90–270 м), в своем максимальном проявлении, отображается на отрезке 180–210 м. Она выделяется резким повышением значений потенциалов (от 12,8 до 40 мВ) по данным ЕП и низкими значениями УЭС (менее 200 Ом·м). практически по всей глубине разреза. На данных георадиолокации этот участок отличается снижением интенсивности отражений электромагнитных волн от подошвы сезонно-талого слоя, а на отрезке 190–210 м эта граница практически не прослеживается. При этом, опираясь на данные электротомографии, можно сделать вывод, что на участке 190–210 м имеется сквозной талик.

Выводы

Полученные результаты геофизических наблюдений показали эффективность комплексирования электроразведочных методов для оценки криогенного состояния грунтов. Сопоставление данных отдельных методов исследования разных электрофизи-

ческих параметров горных пород позволяет получать более полное и точное представление о геокриологической обстановке изучаемой территории.

Проведенные исследования показали, что зоны с наличием мерзлых пород и линзы льда характеризуются высокими значениями УЭС (от 1000 Ом·м) при низких показаниях ВП (до 5 %), а таликовые зоны – низкими значениями УЭС (до 300 Ом·м) со значительно высокими ВП (9–15 %). Георадиолокационное зондирование позволило выявить границу слоя сезонного оттаивания, где на радарограмме с высоким контрастом отражаются зоны с наличием линзы льда и мерзлых пород. В интервале профиля 150–210 м граница сезонно-талого слоя выделяется в основном по прерывистым осям синфазности с переменной контрастностью, что объясняется слабыми отражениями или их отсутствием на границе подошвы сезонно-талого слоя и зоны талика. Метод измерения естественного электрического поля также показал результативность в представлении дополнительной информации о сквозной таликовой зоне в виде высоких значений потенциалов – 12,8–40 мВ. Таким образом, комплексный анализ данных электроразведочных исследований показал хорошую сопоставимость разных электрофизических свойств горных пород при оценке их криогенного состояния.

Заключение

Использование комплекса электроразведочных методов в составе инженерно-геологических изысканий для оценки геокриологической обстановки территории дает более точное представление о криогенном состоянии грунтов, чем монометоды. Это способствует принятию более обоснованных решений при проектировании инженерно-технических, гидротехнических, горнотехнических и других сооружений в зоне вечной мерзлоты. Изучение разных электрофизических параметров электромагнитного поля (удельное электрическое сопротивление, вызванная поляризация, диэлектрическая проницаемость, естественные потенциалы) дает возможность детально обследовать массив на наличие таликовых зон, линз льда, криопэгов и других опасных объектов в криолитозоне.

Список литературы

- Соловьев Е.Э., Саввин Д.В., Федорова Л.Л. Исследование геокриологических условий массива многолетнемерзлых пород неразрушающими электромагнитными методами // Горный журнал. 2019. № 2. С. 31–37. URL: <https://www.rudmet.ru/catalog/journal/1796> (дата обращения: 20.09.2025). DOI: 10.17580/gzh.2019.02.06.
- Нерадовский Л.Г. Опыт применения георадиолокации на Северо-Востоке Якутии // Инженерные изыскания. 2013. № 2. С. 26–37. URL: https://www.geomark.ru/journals_list/zhurnal-inzhenernye-izyskaniya-22013 (дата обращения: 20.09.2025).
- Великин С.А. Возможности использования геофизических методов при изучении состояния гидротехнического сооружения в криолитозоне на примере накопителя минерализованных вод Тымтайдах // Инженерные изыскания. 2013. № 9. С. 52–59. URL: https://www.geomark.ru/journals_list/zhurnal-inzhenernye-izyskaniya-92013 2 (дата обращения: 22.09.2025).
- Дмитриев Ю.Ю. Применение электроразведки при инженерных изысканиях в криолитозоне // Инженерная геология. 2008. № 1. С. 56–60. URL: https://www.geomark.ru/journals_list/zhurnal-inzhenernaya-geologiya-12008 (дата обращения: 22.09.2025).
- Шестернев Д.М., Омельяненко П.А. Повышение эффективности реализации инженерно-геофизических методов при исследовании грунтов криолитозоны // Вестник Забайкальского государственного университета. 2018. Т. 24. № 1. С. 41–50. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32580379> (дата обращения: 22.09.2025). DOI: 10.21209/2227-9245-2018-24-1-41-50.
- Попов С.В., Кашкевич М.П., Романова Н.Е., Малышева А.М., Лебедева Л.С. Выявление субаэральных таликов геофизическими методами в средней части бассейна р. Лена, Центральная Якутия // Записки Горного института. 2025. Т. 274. С. 63–75. URL: https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16396?setLocale=ru_RU (дата обращения: 25.09.2025).
- Саввинов И.И., Федорова Л.Л. Мониторинг изменения строения бугров пучения методами электроразведки в Чурапчинском районе Якутии // Успехи современного естествознания. 2024. № 12. С. 119–125. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=38358> (дата обращения: 23.09.2025). DOI: 10.17513/use.38358.
- Хасанов И.М., Волков В.Н. Использование геофизических методов для изучения криогенного состояния пород разрабатываемых золоторудных месторождений Магаданской области // Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН. 2021. № 1. С. 30–39. URL: http://vestnik.north-east.ru/2021/n1/ft_Khasanov.pdf (дата обращения: 25.09.2025). DOI: 10.34078/1814-0998-2021-1-30-39.
- Владов М.Л., Судакова 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: 22.09.2025).
- Бобачев А.А., Горбунов А.А. Двумерная электроразведка методом сопротивлений и вызванной поляризации: аппаратура, методики, программное обеспечение // Разведка и охрана недр. 2005. № 12. С. 52–54. URL: <http://rion-journal.com/issues/free> (дата обращения: 22.09.2025).
- Судакова М.С., Брушков А.В., Великин С.А., Владов М.Л., Зыков Ю.Д., Неклюдов В.В., Оленченко В.В., Пушкарев П.Ю., Садуртдинов А.Г., Скворцов А.Г., Царев А.М. Геофизические методы в геокриологическом мониторинге // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2022. № 6. С. 141–151. URL: <https://vestnik.geo.msu.ru/jour/article/view/551> (дата обращения: 22.09.2025).
- Лазурченко А.В., Шойхонова Т.С., Шкир М.С., Белова А.Ю., Терешкин С.А. Оценка возможности поиска подземных вод методом электротомографии по данным численного моделирования в условиях, осложненных многолетнемерзлыми породами (на примере территории восточной части Республики Бурятия) // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. 2024. Т. 335. № 7. С. 81–95. URL: <https://elibrary.ru/contents.asp?id=68584404> (дата обращения: 22.09.2025). DOI: 10.18799/24131830/2024/7/4348.

13. Модин И.Н., Груздев А.И., Скобелев А.Д. Сравнение бесконтактных электроразведочных комплексов // Инженерные изыскания. 2016. № 2. С. 46–53. URL: https://www.geomark.ru/journals_list/zhurnal-inzhenernye-izyskaniya-2201 (дата обращения: 22.09.2025).
14. Федорова Л.Л., Куляндин Г.А., Прудецкий Н.Д. Определение участков талых пород в многолетнемерзлом массиве по данным георадиолокации // Успехи современного естествознания. 2023. № 11. С. 192–198. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=38163> (дата обращения: 24.09.2025). DOI: 10.17513/use.38163.
15. Ефремов И.Д., Большаков Д.К., Модин И.Н. Извлечение информации о естественном поле из данных электро-
- томографии для решения инженерно-геологических задач // Вестник Филиала Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова в городе Душанбе. 2022. Т. 1. № 2 (23). С. 103–112. URL: <https://msu.tj/file/vestnik/vestnik2022-en-t1-23.pdf> (дата обращения: 22.09.2025).
16. Козлов В.И., Баишев Д.Г., Павлов Е.А., Федорова Л.Л., Куляндин Г.А. Естественные потенциалы в криолитозоне 2017–2024 // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: материалы XXX Юбилейного Международного симпозиума (г. Санкт-Петербург, 01–05 июля 2024 г.). Томск: Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, 2024. С. 859–863. [Электронный ресурс]. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=76064478> (дата обращения: 25.09.2025). DOI: 10.56820/OAO30D12.

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 № 0297-2021-0020, ЕГИСУ НИОКР № 122011800086-1) с использованием оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

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 No. 0297-2021-0020, EGISU R&D No. 122011800086-1) using the equipment of the Central Research Center of the YANGTSE SB RAS.

УДК 556.5.06:556.53
DOI 10.17513/use.38456

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕАНАЛИЗА ДЛЯ ОЦЕНКИ СТОКА РЕКИ БУРЕЯ

¹Федоровский А.С., ²Бортин Н.Н., ²Кролевецкая Ю.В., ³Костык В.А.

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

«Дальневосточное отделение Российской академии наук», Владивосток,
Российская Федерация, e-mail: as.fedorovskiy@mail.ru;

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

«Российский научно-исследовательский институт комплексного использования
и охраны водных ресурсов», Дальневосточный филиал, Владивосток, Российской Федерации;

³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

«Тихоокеанский институт географии Дальневосточного отделения
Российской академии наук», Владивосток, Российской Федерации

Оценка стока рек при недостаточности или отсутствии данных гидрометрических наблюдений представляет одну из сложных проблем в решении водохозяйственных задач в бассейнах рек Дальнего Востока. Цель исследования – оценить характеристики стока одного из крупнейших притоков реки Амур – реки Бурея у с. Малиновка (площадь водосбора 67 400 км²) за период с 1979 по 1987 год с помощью глобального реанализа стока GloFAS-ERA5 v4. В основе реанализа лежит гидрологическая модель с открытым исходным кодом LISFLOOD, которая полуавтоматически калибруется с использованием наблюденных расходов воды в реках по всему миру, а также реанализ атмосферы ERA5 в качестве входных метеоданных. Выполненные авторами статьи исследования показали, что в целом реанализ достаточно точно воспроизводит гидрограф речного стока р. Бурея, коэффициент корреляции между измеренными и рассчитанными средними суточными расходами воды за рассматриваемый период составляет 0,897. Наблюдается некоторое преуменьшение отдельных характеристик речного стока, отмеченное ранее другими авторами. Так, средние суточные расходы воды в среднем на 4,07% меньше наблюденных. Сток по годовым и месячным интервалам также несколько ниже наблюденного стока, среднее отклонение составляет 3,85 и 4,01% соответственно. Недооценены на 25,5% наибольшие в году суточные расходы воды. В целом критерии качества моделирования Нэша-Сатклифа (NSE) и Клинга-Гупты (KGE) для суточного стока достаточно высокие и составляют 0,802 и 0,879 соответственно.

Ключевые слова: речной сток, гидрологическое моделирование, водосбор, реанализ стока, река Бурея

USING HYDROLOGICAL REANALYSIS TO ASSESS THE RUNOFF OF THE BUREYA RIVER

¹Fedorovskiy A.S., ²Bortin N.N., ²Krolevetskaya Y.V., ³Kostyk V.A.

¹Federal State Budgetary Institution of Science “Far Eastern Branch
of the Russian Academy of Sciences”, Vladivostok, Russian Federation,
e-mail: as.fedorovskiy@mail.ru;

²Federal State Budgetary Institution of Science “Russian Scientific Research
Institute for Integrated Use and Protection of Water Resources”,
Far Eastern Branch, Vladivostok, Russian Federation;

³Federal State Budgetary Institution of Science “Pacific Institute of Geography
of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences”,
Vladivostok, Russian Federation

River runoff assessment, when hydrometric data are insufficient or absent, is one of the complex problems in solving water management issues in the river basins of the Far East. The objective of this study was to assess the runoff characteristics of one of the largest tributaries of the Amur River, the Bureya River near the village of Malinovka (catchment area 67,400 km²), for the period from 1979 to 1987 using the GloFAS-ERA5 v4 global runoff reanalysis. The reanalysis is based on the open-source hydrological model LISFLOOD, which is semi-automatically calibrated using observed river discharges worldwide, as well as the ERA5 atmospheric reanalysis as input meteorological data. The authors' research showed that, overall, the reanalysis accurately reproduces the Bureya River runoff hydrograph; the correlation coefficient between measured and calculated average daily water discharges for the period under review is 0,897. Some underestimation of certain river runoff characteristics, previously noted by other authors, is observed. For example, average daily water discharges are, on average, 4,07% lower than observed discharges. Runoff for annual and monthly intervals is also slightly lower than observed runoff, with average deviations of 3,85% and 4,01%, respectively. The highest annual daily water discharges are underestimated by 25,5%. In general, the Nash-Sutcliffe (NSE) and Kling-Gupta (KGE) modelling quality criteria for daily runoff are quite high and amount to 0,802 and 0,879, respectively.

Keywords: river runoff, hydrological modeling, catchment, runoff reanalysis, Bureya River

Введение

Недостаточность или отсутствие надежных и длительных наблюдений за стоком воды рек в бассейне реки Амур и его притоков является одной из сложных проблем в регулировании стока и защите территории от наводнений. Наряду с существующими подходами в определении характеристик речного стока в таких условиях начинают привлекаться данные реанализов стока [1-3]. Реанализ объединяет прошлые наблюдения с гидрологическими моделями для создания последовательных временных рядов речного стока, важным условием эффективной работы которых является наличие опорной сети гидрометрических наблюдений для подбора параметров, а также методик регионализации этих параметров в условиях отсутствия данных наблюдений, например [4; 5]. Потенциал регионального реанализа речного стока R5 с разрешением по времени один месяц и пространственным разрешением $0,5^\circ$ применительно к задаче определения расчетных гидрологических характеристик оценен на примере пяти водосборов в бассейне Верхней Волги с площадями водосборов от 1030 до 11 600 км² [6]. Авторами исследования показано, что отклонения моделированного среднегодового многолетнего расхода воды и его расчетных (обеспеченных) величин от справочных данных являются незначительными. Оценка возможности использования глобального GloFAS-ERA5, а также регионального R5 реанализов стока для определения характеристик максимального суточного дождевого стока выполнена на примере пяти водосборов в бассейне р. Полометь с площадями водосборов от 48,3 до 2180 км² [7]. Установлено, что региональный реанализ стока показывает более хорошие результаты, чем глобальный. Однако только глобальный реанализ стока GloFAS-ERA5 охватывает территорию Дальнего Востока. Последний позволил, например, восстановить гидрограф суточного стока в устье неизученной р. Налычева (Камчатка) площадью водосбора 1439 км² [8]. Таким образом, результаты исследований показывают, что реанализ речного стока является достаточно надежным источником данных. В то же время отмечается, что наличие выраженных региональных различий в результатах моделирования делает актуальными исследования применимости реанализов стока в различных регионах, особенно страдающих недостаточной гидрологической изученностью [9].

Цель исследования – оценка точности воспроизведения суточных, месячных, годовых и максимальных в году суточных расходов воды одного из крупных притоков Амура – горной р. Бурея у с. Малиновка с помощью данных реанализа речного стока GloFAS-ERA5 v4.

Материалы и методы исследования

Река Бурея – левый приток в среднем течении реки Амур. Бассейн расположен на территории Хабаровского края и Амурской области, он ограничен хребтами Малого Хингана, Буреинского, Дуссе-Алинь, Эзоп и Турана, образующих почти замкнутый контур овальной формы, вытянутый в северо-восточном направлении. Максимальные высоты рельефа на севере и северо-востоке бассейна достигают 2000–2500 и 900–1200 м на западе и востоке. В средней его части находится Верхне-Буреинская котловина с высотами 300–500 м. После выхода из гор и до устья река течет в пределах предгорий и Зейско-Буреинской равнины. Пониженные участки равнин заболочены [10].

Основные характеристики Глобального сеточного реанализа речного стока GloFAS-ERA5 v4 (далее – реанализ стока):

горизонтальное покрытие:

90° с. ш. – 60° ю. ш., 180° з. д. – 180° в. д.;

доступный период:

с 1979 г. по настоящее время;

пространственное разрешение сетки:

$0,05^\circ \times 0,05^\circ$;

разрешение по времени: одни сутки;

доступность по ссылке:

<https://ewds.climate.copernicus.eu>;

формат данных: GRIB2 и NetCDF-4.

В основе реанализа лежит гидрологическая модель с открытым исходным кодом LISFLOOD, которая полуавтоматически калибруется с использованием наблюдаемых расходов воды в реках по всему миру. В качестве входных метеоданных используется реанализ атмосферы ERA5, в котором генерируется так называемый климатический сток. Трансформация климатического стока выполняется гидрологической моделью, что позволяет рассчитать движение воды между соседними ячейками водосбора и оценить приток воды в русло реки. Гидрологическая модель генерирует непрерывный многолетний ряд ежедневных расходов воды – реанализ стока – в реках площадью от 500 км² с практически глобальным пространственным охватом [11].

Данные наблюдений за стоком воды р. Бурея в створе у с. Малиновка ($F=67\,400$ км²)

были получены из общедоступной базы данных речного стока GRDC (<https://portal.grdc.bafg.de>) за период с 1979 по 1987 год, в котором, с одной стороны, сток относительно не нарушен (в том числе из-за построенного водохранилища), а с другой – есть доступные данные реанализа стока.

Погрешности моделирования речного стока оцениваются статистическими методами, принятыми в гидрологических прогнозах, а также рядом специально разработанных для этих целей критериев [12; 13]. В отечественной и мировой практике наибольшую популярность имеет критерий Нэша-Сатклифа (Nash-Sutcliffe – NSE):

$$NSE = 1 - \left[\sum_{k=1}^N (y_k - o_k)^2 / \sum_{k=1}^N (o_k - \bar{o})^2 \right], \quad (1)$$

где y_k – рассчитанный расход воды, o_k – наблюденный расход воды, \bar{o} – средний по выборке расход воды.

Чем ближе NSE к единице, тем выше точность моделирования.

При $NSE > 0,75$ соответствие наблюденного и рассчитанного (моделированного) гидрографов стока рассматривается как хорошее.

При $0,35 < NSE \leq 0,75$ – как удовлетворительное [14].

Другой популярный критерий – Клинга-Гупты (Kling-Gupta – KGE):

$$KGE = 1 - \sqrt{\left((r-1)^2 + \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_0} - 1 \right)^2 + \left(\frac{\mu_s}{\mu_0} - 1 \right)^2 \right)}, \quad (2)$$

где r – коэффициент корреляции Пирсона, σ_s и μ_s – среднеквадратические отклонения (стандарты) и средние значения наблюденных и моделюемых данных.

Критерий KGE комплексно учитывает динамику стока, в том числе временные сдвиги через корреляцию, изменчивость стока через отношения стандартов и смещение на уровне средних между наблюдаемыми и моделюемыми расходами воды. Чем ближе KGE к единице, тем выше точность моделирования [14].

Кроме критериев NSE и KGE, для характеристики точности результатов моделирования стока рассматривается параметр BIAS (смещение/отклонение), который определяет среднее отклонение рассчитанных (моделируемых) y_k от наблюденных o_k значений (в нашем случае расходов воды):

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_k - o_k). \quad (3)$$

В случае использования абсолютной величины разности в уравнении (3) – это параметр MAE (Mean Absolute Error). Относительное отклонение в % от среднего наблюдаемых расходов оценивается параметром PBIAS (Percent BIAS):

$$PBIAS = \frac{BIAS}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N o_k} \times 100\%. \quad (4)$$

Применяется также коэффициент парной корреляции Пирсона между наблюдаемыми и моделюемыми характеристиками стока r , его квадрат, называемый коэффициентом детерминации (R^2). Наибольшая теснота связей наблюдается при стремлении их значений к 1.

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 1 показано сопоставление наблюденных и рассчитанных (реанализ стока) средних суточных расходов воды р. Бурея. Как видно из рисунка, рассчитанный сток в целом соответствует наблюденному стоку, что подтверждается также статистическими характеристиками. Так, среднее наблюденных и рассчитанных значений за весь рассматриваемый период составляет 819 и 853 m^3/s соответственно. При стандартных ошибках средних 18,0 и 19,0. Отклонение стока реанализа в сторону преумножения составляет 4,07%. Рассеивание данных относительно среднего значения у рассчитанных данных несколько ниже, чем наблюденных: стандартное отклонение составляет 1033 и 1088 m^3/s соответственно. Медианные значения наблюденного и рассчитанного стока равны 322 и 369 m^3/s соответственно, различие – 12,8%. Как видно из рис. 1, данные реанализа формируют слишком крутую ветвь спада осенних расходов воды, поэтому его наименьший расход ниже, чем наблюденного стока: 0,0 и 4,6 m^3/s соответственно, что в целом не существенно при наблюдаемом среднем многолетнем стоке 888 m^3/s . Недооценены на 20,3% наибольшие за этот период расходы воды: 6780 и 8510 m^3/s соответственно, что также приемлемо для этой фазы водного режима. Коэффициент корреляции между измеренными и рассчитанными средними суточными расходами воды r составляет 0,897 при стандартной ошибке $\sigma_r = 0,003$, что указывает на хорошую синхронность их колебаний. Безразмерные критерии качества моделирования NSE и KGE для сред-

них суточных расходов воды – достаточно высокие и составляют 0,802 и 0,879 соответственно. В целом можно считать, что реанализ с приемлемой для практики точностью воспроизводит гидрограф суточного стока.

Годовой сток в целом оценивается достаточно успешно (таблица). Как видно из таблицы, в 1979–1981 и 1985–1987 гг. рассчитанные средние годовые расходы воды меньше наблюденных расходов воды ($BIAS < 0$), а в 1982–1984 гг. – их превышают ($BIAS > 0$). Наименьшее отклонение рассчитанного стока составляет $-3,0 \text{ м}^3/\text{с}$ (0,457% от наблюденного годового стока) в 1979 году, наибольшее – $-186 \text{ м}^3/\text{с}$ (18,0%) в 1987 году.

Сток незначительно завышен в 1982 году (2,08%), достигая 14,8% – в 1984 году (таблица). В среднем за 1979–1987 гг. отклонение рассчитанного стока (PBIAS) составляет $-4,07\%$. При этом средняя абсолютная ошибка равна $71,8 \text{ м}^3/\text{с}$ (8,46% от наблюденного годового стока). Значительная ошибка расчета стока в 1987 году, по-видимому, связана с многоводностью года, обусловленной

прохождением высоких паводков в течение всего теплого периода. По данным наблюдений, в этом году средний годовой расход воды составляет $1034 \text{ м}^3/\text{с}$ при среднегодовом многолетнем расходе воды $888 \text{ м}^3/\text{с}$.

Внутригодовое распределение стока – важнейшая характеристика водохозяйственных расчетов. На рис. 2. приведено сопоставление средних за рассматриваемый период средних месячных расходов воды.

Среднее относительное отклонение рассчитанных месячных расходов воды от наблюденных (PBIAS) составляет $-4,01\%$, т.е. сток несколько недооценивается. Абсолютная погрешность (MAE) составляет $131 \text{ м}^3/\text{с}$ (15,4% от среднемесячного стока). Наибольшее занижение рассчитанного стока по отношению к наблюденному стоку характерно для месяцев с низкой водностью (I–III и XII). В то же время рассчитанный сток в период половодья примерно на 117% выше наблюденного стока в апреле и на 10,9% – в мае (400 и $179 \text{ м}^3/\text{с}$ в абсолютном выражении).

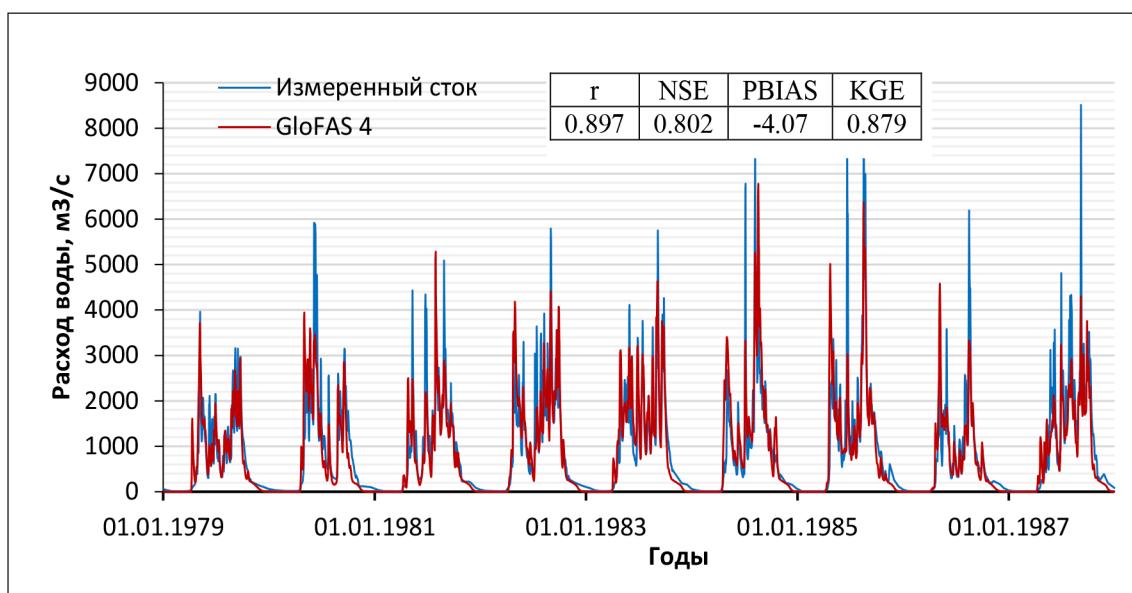


Рис. 1. Измеренные и рассчитанные средние суточные расходы воды р. Бурея у с. Малиновка за период с 1.01.1979 по 31.12.1987

Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования

Сопоставление наблюденных и рассчитанных средних годовых расходов воды

Годы	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	Среднее
Наблюдения	657	805	795	913	965	843	1007	619	1034	849
GloFAS v4	654	707	711	932	990	968	939	581	848	814
BIAS, $\text{м}^3/\text{с}$	-3,0	-98,0	-84,0	19,0	25,0	125	-68,0	-38,0	-186	-34,2

Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования.

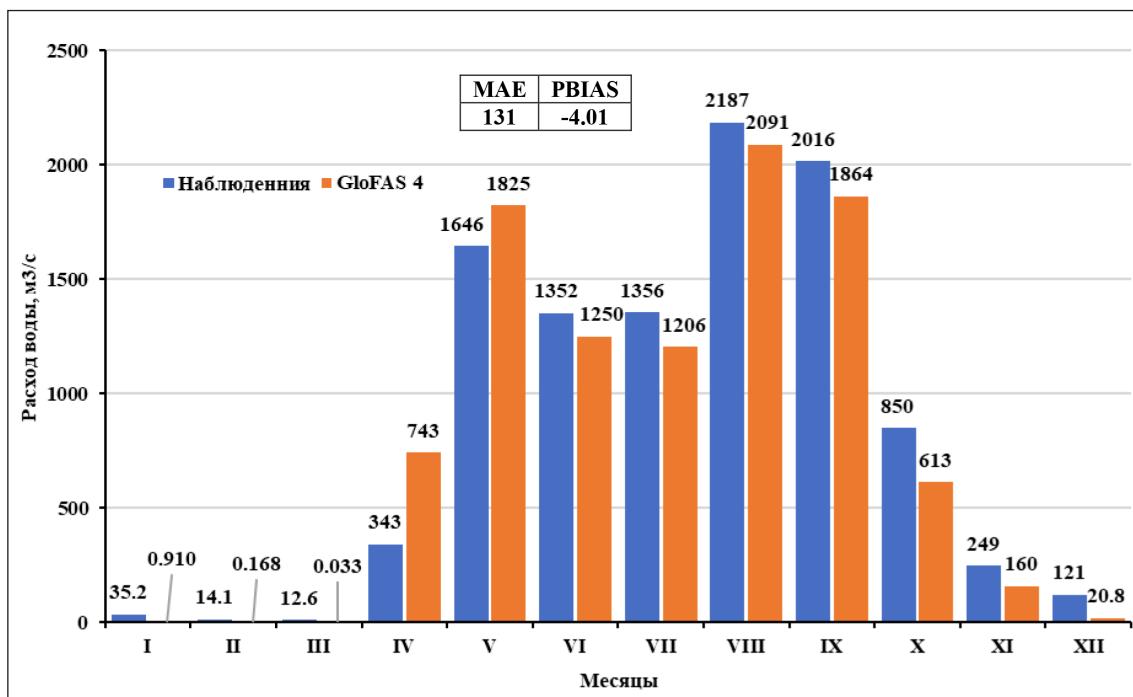


Рис. 2. Распределение наблюденных и рассчитанных средних расходов воды

за месяц р. Бурея у с. Малиновка за период с 1979 по 1987 г.

Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования

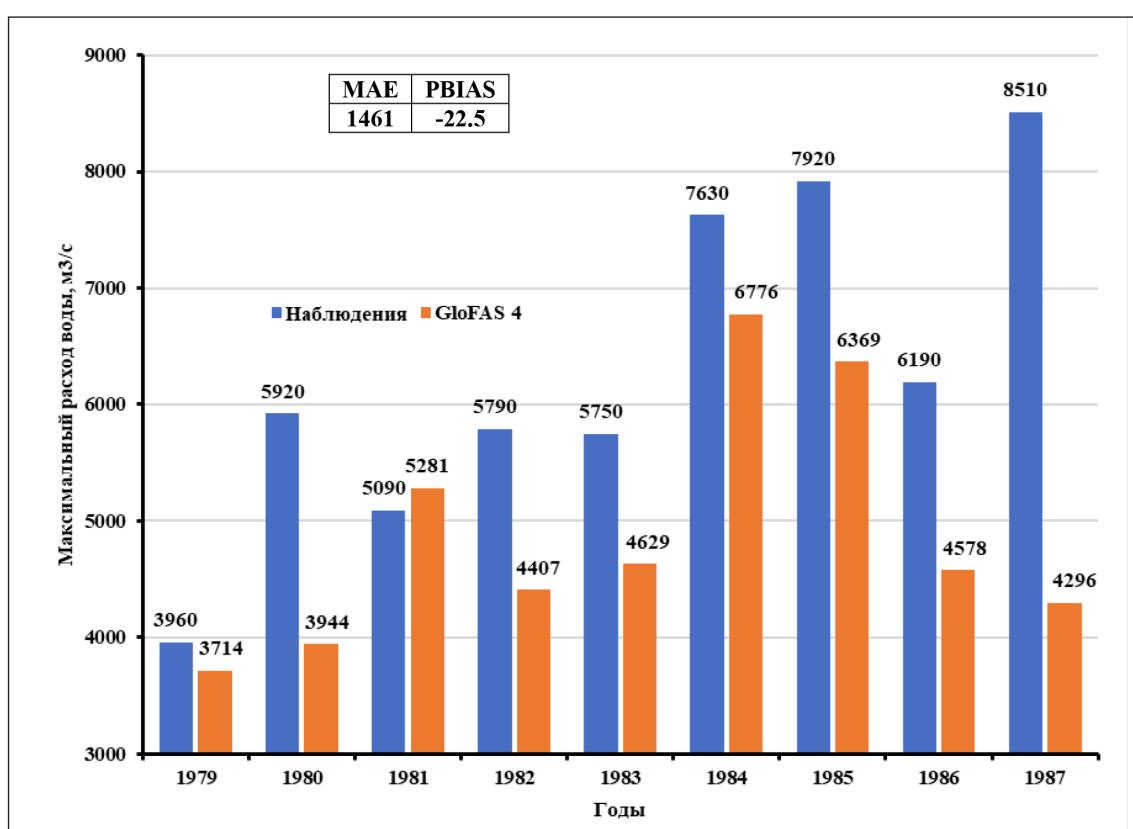


Рис. 3. Наблюденные и рассчитанные максимальные в году средние суточные расходы воды р. Бурея у с. Малиновка, m^3/s

Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования

В летний период (VI – VIII) и в начале осени (IX), в период формирования дождевых паводков, рассчитанные расходы воды незначительно ниже наблюденных от -4,4 до -11,1% соответственно. МАЕ здесь составляет около 100–150 м³/с. По мере снижения стока в осенний период (X – XI) относительное отклонение растет до -28 – -36% (рис. 2). Таким образом, внутригодовое распределение стока система GloFAS 4 в целом моделирует достаточно успешно, в том числе и во время летне-осенних паводков. Однако сток весеннего половодья моделируется менее качественно, так же как и сток воды в период зимней межени, что, вероятно, связано с системными проблемами моделирования стока в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов.

Максимальный сток играет определяющую роль в вопросах защиты территории от наводнений, прогнозирования русловых деформаций и в других приложениях. Распределение максимальных в году суточных расходов воды показано на рис. 3. В целом максимальные средние суточные расходы воды реанализ стока не дооценивает, за исключением 1981 года. Наименьшие отклонения рассчитанных суточных максимумов от наблюденных отмечены в 1979 и 1981 годах: -6,21 и 3,75% соответственно, которые тяготеют больше к маловодным годам (соответственно 657 и 795 м³/с при среднегодовом многолетнем расходе воды 888 м³/с). Однако в еще более маловодном 1986 году (619 м³/с) рассчитанный максимальный расход меньше наблюденного на 26%. Наибольшее отклонение – в относительно многоводном 1987 году, оно составляет -49,5%.

Среднее относительное отклонение PBIAS за рассматриваемый период составляет -22,5%, или 1461 м³/с в абсолютном выражении. Это в целом соответствует выводам, сделанным в работе [2], о занижении реанализом стока GloFAS–ERA5 в среднем на 20% максимального суточного дождевого стока для равнинных водосборов площадью более 2000 км², что может говорить о системности ошибки и необходимости корректировки данных [15].

Заключение

Результаты исследования показывают, что данные реанализа позволяют достаточно хорошо воспроизводить гидрограф стока воды. В среднем за рассмотренный период наблюдается незначительное преуменьшение (на 4,07%) рассчитанных сред-

них суточных расходов воды по сравнению с наблюдеными. При этом безразмерные критерии качества моделирования суточного стока NSE и KGE – достаточно высокие и составляют 0,802 и 0,879 соответственно. Достаточно успешно оценивается годовой сток и его внутригодовое распределение. Среднее относительное смещение (преуменьшение) для годовых и средних месячных расходов воды составляет около 4%. Таким образом, исследование показывает, что реанализ может быть использован для оценки стока рек, сходных по условиям с р. Бурея. Это открывает новые возможности по учету стока неизученных рек в бассейне реки Амур, в том числе в трансграничных районах. Однако, как отмечают исследователи, качество моделирования меняется в зависимости от местоположения, поэтому может потребоваться коррекция данных реанализа для соответствующих природных условий перед практическим использованием.

Список литературы

1. Beck H.E., van Dijk A. I.J.M., de Roo A., Dutra E., Fink G., Orth R., Schellekens J. Global Evaluation of Runoff from 10 State-of-the-Art Hydrological Models // Hydrology and Earth System Sciences. 2017. Vol. 21. Is. 6. P. 2881–2903. DOI: 10.5194/hess-21-2881-2017.
2. Lin P., Pan M., Beck H.E., Yang Y., Yamazaki D., Frasson R., David C.H., Durand M., Pavelsky T.M., Allen G.H., Gleason C.J., Wood E.F. Global Reconstruction of Naturalized River Flows at 2.94 Million Reaches // Water Resource Research. 2019. Vol. 55. Is. 8. P. 6499–6516. DOI: 10.1029/2019WR025287.
3. Senent-Aparicio J., Blanco-Gómez P., López-Ballesteros A., Jimeno-Sáez P. Evaluating the potential of GloFAS-ERA5 river discharge reanalysis data for calibrating the SWAT model in the Grande San Miguel river basin (El Salvador) // Remote Sensing. 2021. Vol. 13. 3299. DOI: 10.3390/rs13163299.
4. Hirpa F.A., Salamon P., Beck H.E., Lorini V., Alfieri L., Zsoter E., Dadson S.J. Calibration of the Global Flood Awareness System (GloFAS) Using Daily Streamflow Data // Journal of Hydrology. November 2018. Vol. 566. P. 595–606. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.09.052.
5. Романов А.В. Взгляд на региональную Европейскую систему предупреждения о наводнениях с учетом партнерских отношений с нашей Российской Федерацией // Ученые записки РГГМУ 2019. № 57. С. 176–186. URL: <https://www.rshu.ru/university/notes/archive/issue57/UZ-57-el.pdf> (дата обращения: 07.09.2025).
6. Айзель Г.В., Белозёров Е.В., Курочкина Л.С. Определение расчетных гидрологических характеристик при отсутствии данных гидрометрических наблюдений: потенциал использования регионального сеточного реанализа речного стока // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2020. № 2. С. 83–101. DOI: 10.35567/1999-4508-2020-2-6.
7. Грек Е.Н. Пространственно-временная изменчивость дождевых паводков на малых и средних реках Северо-Запада России. Автореферат на соискание ученой степени кандидата географических наук. Санкт-Петербург: ГГИ, 2023. 26 с. URL: <https://www.dissertcat.com/content/prostranstvenno-vremenennaya-izmenchivost-dozhdevykh-pavodkov-na-malykh-i-srednikh-rekakh-seve> (дата обращения: 07.09.2025).

8. Чалов С.Р., Цыпленков А.С., Школьный Д.И., Прокопьева К.Н., Бахарева Е.И. К оценке возможного влияния материкового стока на гибель гидробионтов в Авачинском заливе Тихого океана (Камчатка) // Известия Русского географического общества. 2022. Том 154. № 4. С. 69–84. DOI: 10.31857/S0869607122040048.
9. Alfieri L., Lorini V., Hirpa F.A., Harrigan S., Zsoter E., Prudhomme C., Salamon P. a Global Streamflow Reanalysis for 1980–2018 // Journal of Hydrology. X. 2020. Vol. 6. 100049. DOI: 10.1016/j.jhydroa.2019.100049.
10. Мордовин А.М., Шестеркин В.П., Антонов А.Л. Река Бурея. Гидрология. Гидрохимия. Ихтиофауна. Хабаровск: ИВЭП, 2006. 149 с. URL: <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01003083686> (дата обращения: 07.09.2025).
11. Федоровский А.С., Кролевецкая Ю.В. Глобальная система предупреждения наводнений: гидрологический ре-анализ // Успехи современного естествознания. 2025. № 9. С. 100-105. DOI: 10.17513/use.38434.
12. Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров Ю.А. Выбор методов прогнозирования речного стока // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2024. № 1. С. 71–117. DOI: 10.37162/2618-9631-2024-1-71-117.
13. Gupta H.V., Kling H., Yilmaz K.K., Martinez G.F. Decomposition of the Mean Squared Error and NSE Performance Criteria: Implications for Improving Hydrological Modelling // Journal of Hydrology. 2009. Vol. 377. Is. 1–2. P. 80–91. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.08.003.
14. Krause P., Boyle D.P., Bäse F. Comparison of Different Efficiency Criteria for Hydrological Model Assessment // Advances in Geosciences. 2005. Vol. 5. P. 89–97. DOI: 10.5194/adgeo-5-89-2005.
15. Liu L., Zhou L., Gusyev M., Ren Y. Unravelling and improving the potential of global discharge reanalysis dataset in streamflow estimation in ungauged basins // Journal of Cleaner Production. 2023. Vol. 419. Is. 20. 138282. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.138282.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

УДК 528.442
DOI 10.17513/use.38457

СОЗДАНИЕ 3Д-МОДЕЛИ ОБЪЕКТА КАПИТАЛЬНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА НА ПРИМЕРЕ ТОРГОВО-РАЗВЛЕКАТЕЛЬНОГО ЦЕНТРА «КРАСНАЯ ПЛОЩАДЬ» В Г. КРАСНОДАР

Солодунов А.А. ORCID ID 0000-0001-6609-9398,
Пшидаток С.К. ORCID ID 0000-0001-8514-8677, Шичиях З.З.

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

Целью исследования является применение инновационного оборудования для создания детальной трехмерной модели. В рамках данной работы была проведена комплексная съемка объекта с использованием современных лазерных сканирующих систем, что позволило получить высокоточные данные о геометрии и структуре помещений. Использование передовых технологий сканирования обеспечило минимизацию погрешностей измерений и максимальную детализацию полученных данных. Полученные результаты представляют собой ценный источник информации для дальнейшего анализа и моделирования исследуемого объекта и могут быть интегрированы в специализированное программное обеспечение для построения высокодетализированной трехмерной модели, обеспечивающей визуализацию архитектурных особенностей здания с высокой степенью точности. Одним из перспективных направлений совершенствования визуализации и анализа пространственных характеристик объектов недвижимости является внедрение технологий трехмерного (3D) моделирования. Предложенное техническое решение интегрирует передовые технологии лазерного сканирования, что обеспечивает ему значительное функциональное превосходство. Этот аспект делает данную техническую разработку особенно востребованной для решения широкого спектра задач, охватывающих различные области применения. Результатом исследования является высокоточная и детализированная 3D-модель торгово-развлекательного центра, которая может быть использована для различных целей, включая планирование и координацию строительных работ, оценку объемов и стоимости строительства, а также для демонстрации проекта потенциальным инвесторам и клиентам.

Ключевые слова: визуализация пространственных характеристик, лазерная сканирующая система, трехмерная модель местности, высокая степень точности, инновационное оборудование.

CREATION OF A 3D MODEL OF A CAPITAL CONSTRUCTION FACILITY USING THE EXAMPLE OF THE RED SQUARE SHOPPING CENTER IN KRASNODAR

Solodunov A.A. ORCID ID 0000-0001-6609-9398,
Pshidatok S.K. ORCID ID 0000-0001-8514-8677, Shichiyakh Z.Z.

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

The purpose of the research is to use innovative equipment to create a detailed three-dimensional model. As part of this work, a comprehensive survey of the object was carried out using modern laser scanning systems, which made it possible to obtain highly accurate data on the geometry and structure of the premises. The use of advanced scanning technologies ensured the minimization of measurement errors and the maximum detail of the data obtained. The results obtained represent a valuable source of information for further analysis and modeling of the object under study, which can be integrated into specialized software to build a highly detailed three-dimensional model that provides visualization of the architectural features of the building with a high degree of accuracy. One of the promising areas for improving visualization and analysis of spatial characteristics of real estate objects is the introduction of three-dimensional (3D) modeling technologies. The proposed technical solution integrates advanced laser scanning technologies, which provides it with significant functional superiority. This aspect makes this technical solution particularly in demand for solving a wide range of tasks covering various fields of application. The result of the research is a highly accurate and detailed 3D model of a shopping and entertainment center, which can be used for various purposes, including planning and coordinating construction work, estimating the volume and cost of construction, as well as to demonstrate the project to potential investors and customers.

Keywords: visualization of spatial characteristics, laser scanning system, three-dimensional terrain model, high degree of accuracy, innovative equipment

Введение

В современном мире наблюдается неуклонный рост числа городских агломераций, сопровождающийся интенсивным развитием их инфраструктурных комплексов [1].

Данный процесс приводит к увеличению числа архитектурных объектов, общественных пространств и транспортных узлов, что существенно усложняет пространственную организацию городских территорий [2; 3].

В этих условиях актуализируется проблема обеспечения высокой степени конкретности и полноты информационной базы, касающейся объектов недвижимости [4; 5].

Одним из инновационных решений, направленных на улучшение визуализации и анализа пространственных характеристик объектов недвижимости, является внедрение технологий трехмерного (3D) моделирования [6]. Применение данного метода позволит не только представить объекты в их реальном пространственном контексте, но и детализировать такие параметры, как объем, пространственное положение, взаимное перекрытие контуров и другие геометрические характеристики [7].

Целью данного исследования является применение передовых технологий 3D-сканирования для создания детальной цифровой модели первого этажа торгово-развлекательного центра «Красная площадь», расположенного в городе Краснодар.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования является торгово-развлекательный центр «Красная Площадь» в городе Краснодар Краснодарского края, представляющий собой комплексный объект многофункционального назначения, интегрирующий в себе элементы коммерческой и развлекательной инфраструктуры. Торгово-развлекательный центр (ТРЦ) расположен в Прикубанском округе города Краснодара, в микрорайоне Жукова (ЭНКА), на одной из ключевых транспортных артерий города – Ростовском шоссе.

Результаты исследования и их обсуждение

«Красная Площадь» в Краснодаре – это один из крупнейших в Южном федеральном округе торгово-развлекательных центров (ТРЦ) европейского формата. Он является первым и самым крупным объектом сети холдинга «РАМО-М» на Кубани, открытый в 2003 году. В нем расположены более 500 магазинов, кинотеатр, боулинг, фудкорты, кафе, рестораны, детские площадки и т.д. Состоит из двух корпусов: один со стороны улицы Дзержинского с кадастровым номером 23:43:0128002:365 и другой со стороны Александра Покрышкина с кадастровым номером 23:43:0128002:213.

К основным характеристикам здания отнесена общая площадь ТРЦ, составляющая 61 895,30 м², из которой:

– площадь торгового назначения – 46 583,23 м²;

– площадь общего назначения – 8 730,54 м²;

– площадь складских, инженерных помещений – 3 258,68 м².

На рисунке 1 изображен план 1-го этажа ТРЦ «Красная Площадь» в г. Краснодаре.

Сложные архитектурные формы зданий создают значительные сложности при их контроле, особенно в контексте кадастрового учета и градостроительного планирования [8]. Проблема заключается в необходимости точного определения геометрических параметров и пространственного положения таких объектов для их корректного отображения в реестрах и на картах [9; 10]. В современном градостроительстве всё чаще применяются здания с различной архитектурой, что приводит к естественной проблеме их учета как объектов недвижимости. Для реализации поставленных задач на исследуемом объекте был выбран инновационный метод, относящийся к области геопространственных данных и лазерной локализации [11]. Данный подход позволяет создавать высокоточные пространственные модели объектов, что является достаточно важным фактором для эффективного анализа и интерпретации географических характеристик исследуемой территории [12].

Для корректной эксплуатации необходимо осуществить определение координат двух точек, расположенных на противоположных сторонах здания, с целью их последующей пространственной привязки (рис. 2).

Данный подход обеспечивает высокую точность и надежность функционирования системы, что является достаточно важным для достижения поставленных технических и эксплуатационных целей [13]. Для проведения съемки торгово-развлекательного комплекса «Красная Площадь» в городе Краснодар была применена инновационная разработка, созданная коллективом кафедры геодезии Кубанского государственного аграрного университета имени И.Т. Трубилина [14] (рис. 3).

Изобретение относится к сфере вычислительной техники, используемой в процессе геодезических измерений, и предназначено для создания пространственных моделей помещений. Это устройство применимо в области сбора и обработки геопространственных данных и использует методы лазерного сканирования для определения пространственных характеристик окружающей среды. Особое внимание уделяется интеграции фото- и видеофиксации, что существенно оптимизирует процесс обработки данных (рис. 4).

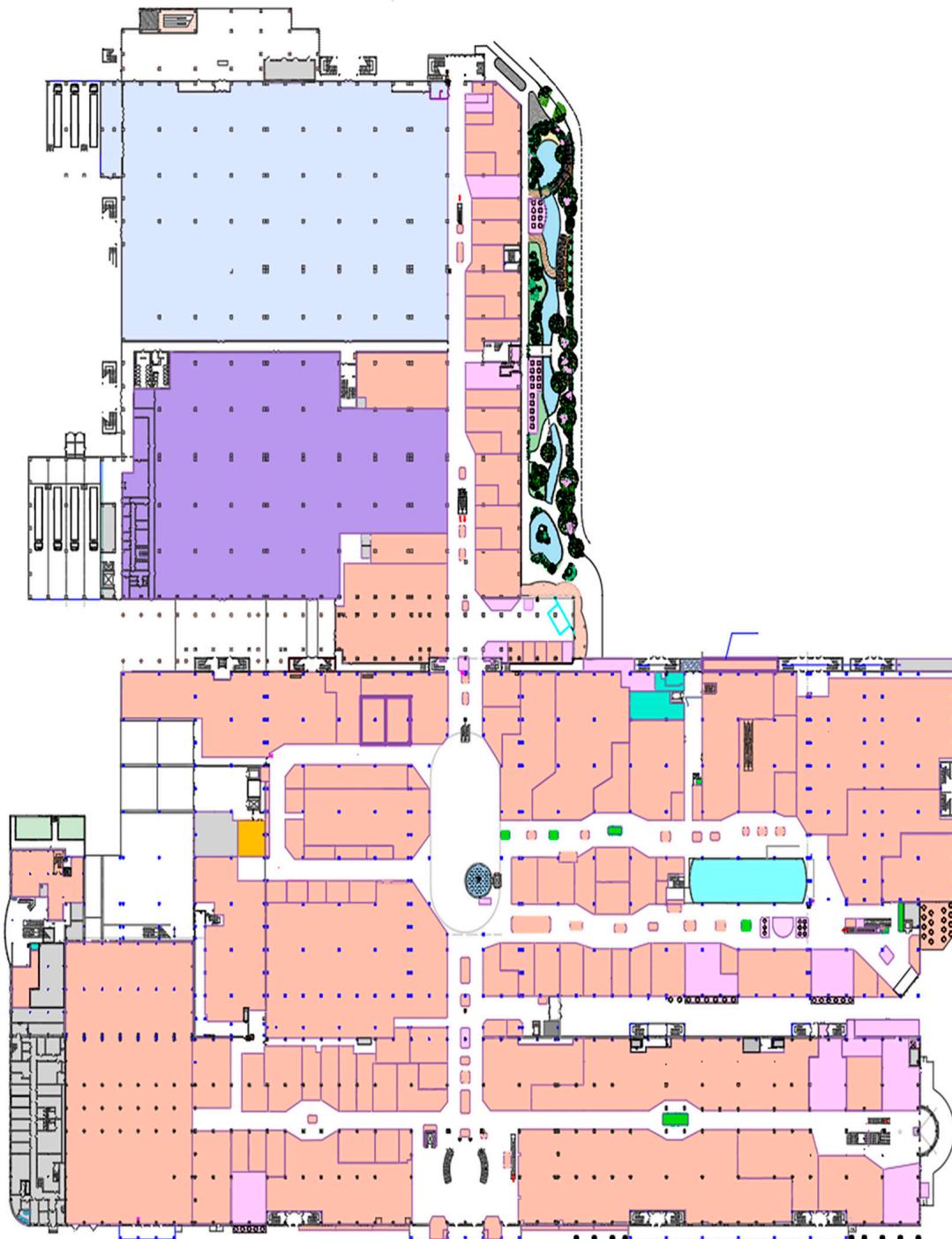


Рис. 1. План 1-го этажа ТРЦ «Красная площадь»
Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования

Лазерные сканеры, испуская луч, отражающийся от окружающих объектов, формируют облако точек с пространственными координатами. В блоке объединения данных облако точек накладывается на фотографии, синхронизируется и сохраняется на запоминающем устройстве. Полученное

облако точек отображается на мониторе оператора в реальном времени, позволяя его просматривать, вращать и проводить измерения [15].

В таблице 1 представлена скорость и время прохождение изобретения по каждому маршруту.

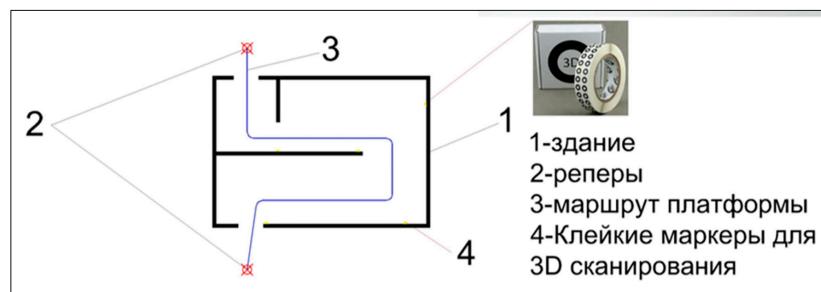


Рис. 2. Принцип 3D-моделирования объекта
Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования



Рис. 3. Изобретение для 3D-моделирования
Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования

СХЕМА РАБОТЫ

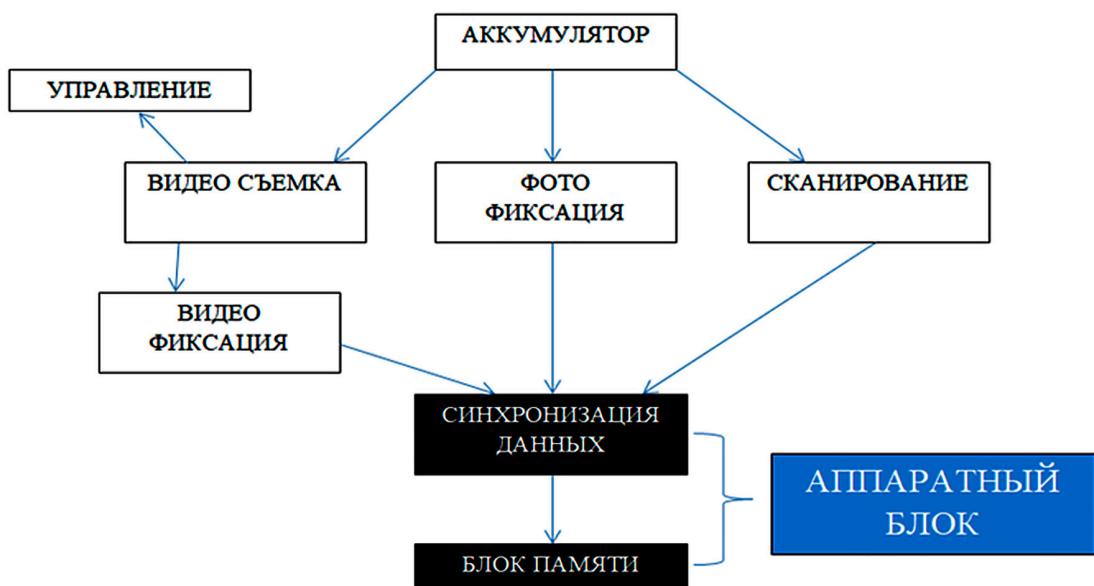


Рис. 4. Схема взаимодействия основных элементов
Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования

Таблица 1

Скорость и время прохождения каждого маршрута

Наименование маршрута	Длина маршрута, м	Скорость движения, км/ч	Время прохождения, мин.
Внешний маршрут	1 378	4	20
1-й маршрут	316	3	30
2-й маршрут	401	3	40
3-й маршрут	389	3	40

Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования.

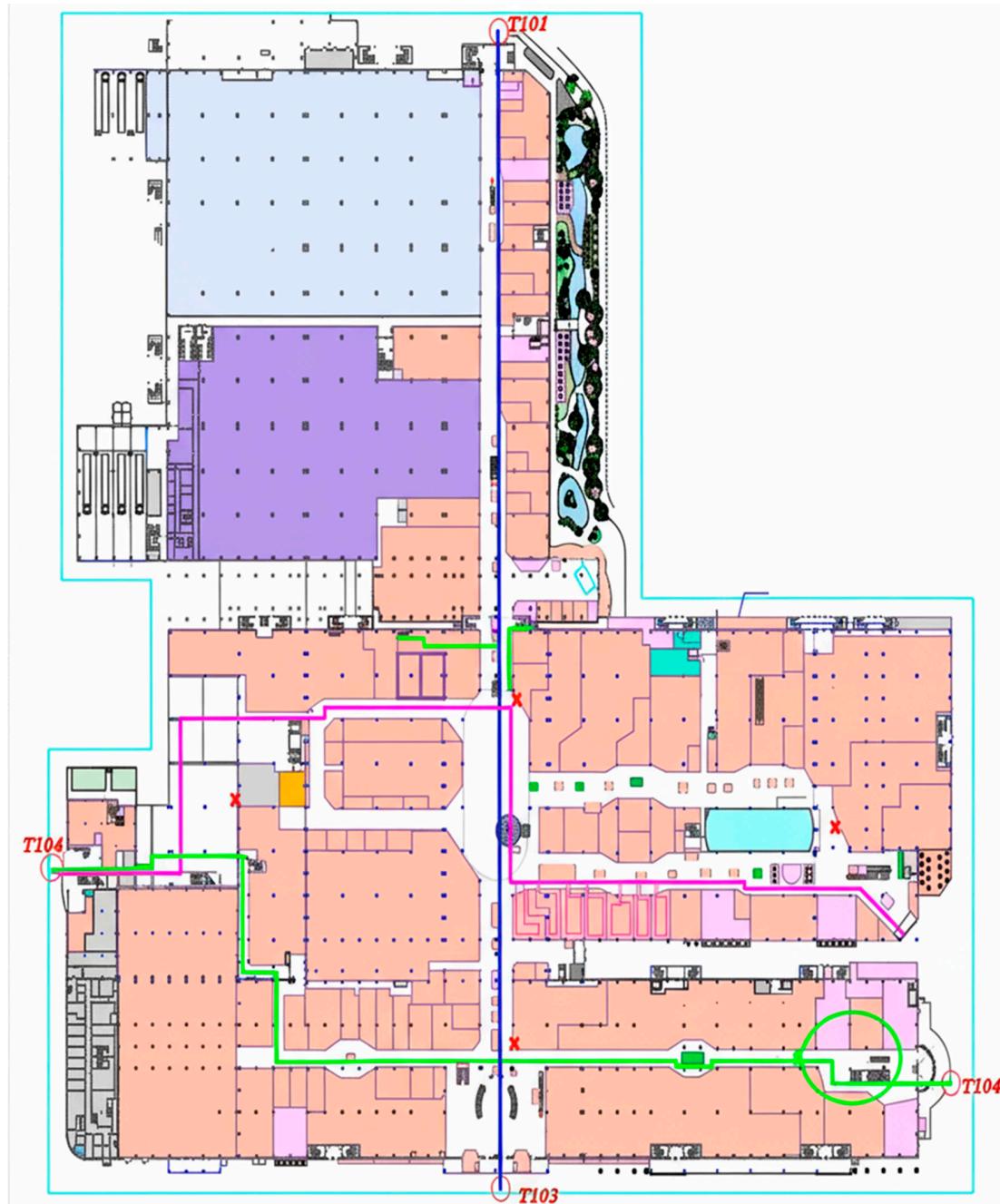


Рис. 5. Схема внутренних и внешних маршрутов изобретения
Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования

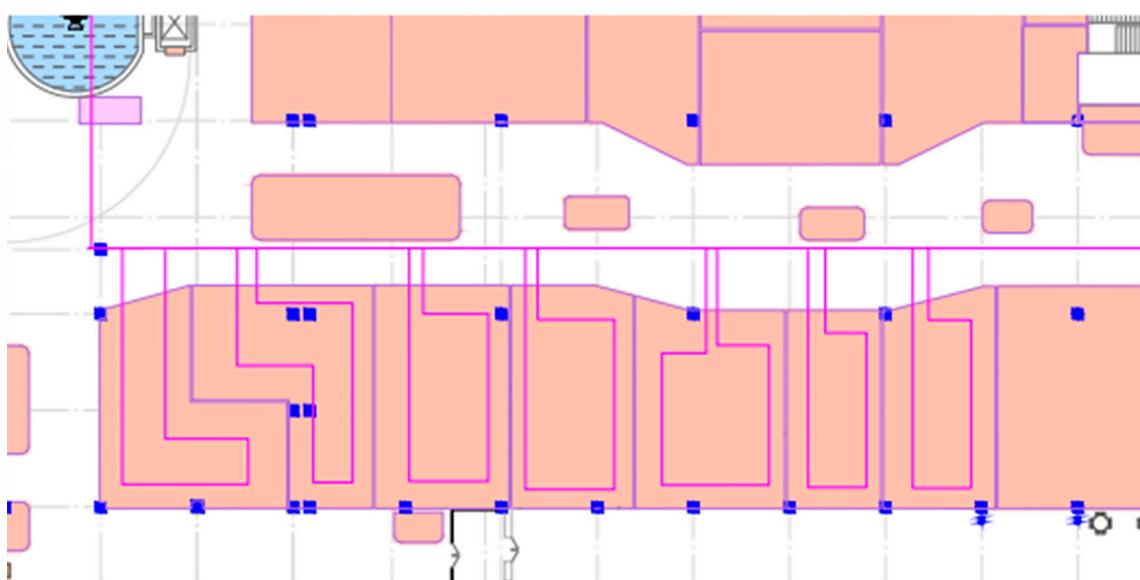


Рис. 6. Примерные маршруты в магазинах ТРЦ «Красная площадь»
Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования

Проведя сравнительный анализ четырех альтернативных маршрутов, можно сделать вывод о том, что внешний маршрут характеризуется наибольшей протяженностью. Однако, принимая во внимание тот факт, что скорость функционирования устройства в данном контексте превышает аналогичные показатели для внутренних маршрутов, можно предположить, что время, необходимое для прохождения внешнего маршрута, будет минимизировано. Этот вывод основывается на предположении о прямой корреляции между скоростью устройства и временными затратами на выполнение задачи. Внутренние маршруты отличаются примерно одинаковой протяженностью, что упрощает обработку данных. На рисунке 5 показана схема внутренних и внешних маршрутов изобретения. Примерные маршруты в магазинах ТРЦ «Красная площадь» показаны на рисунке 6.

В результате сканирования внутренних и внешних конструктивных элементов торгово-развлекательного центра «Красная площадь» в городе Краснодар с применением методов лазерного сканирования было получено облако точек, представляющее собой высокоточные данные о геометрии исследуемых объектов. Эти данные могут быть обработаны с использованием специализированного программного обеспечения для трехмерного моделирования. В част-

ности, посредством любого современного 3D-редактора, обладающего необходимыми функциональными возможностями, облако точек может быть трансформировано в завершенную трехмерную модель помещения.

В ходе выполнения исследования была получена 3D-модель 1-го этажа торгового центра «Красная площадь». На объекте был реализован комплекс мероприятий, охватывающих все аспекты, необходимые для проведения работ. Все организационные вопросы, связанные с деятельностью на объекте, подвергались тщательному согласованию с эксплуатирующими организациями. Проведение работ осуществлялось исключительно в присутствии представителей данных организаций и при наличии соответствующих разрешений, что обеспечивало соответствие нормативным требованиям и стандартам безопасности.

Согласно Приказу Минстроя России от 30.06.2022 г. № 221/пр «Об утверждении Методики определения нормативных затрат на информационное моделирование с учетом использования технологий лазерного сканирования и фотограмметрии» в таблице 2 представлена смета на выполнение проекто-изыскательских работ.

В ходе расчетов установлено, что итоговая стоимость на работы по выполнению инженерно-геодезических изысканий с применением изобретения составила 574 564,40 руб.

Таблица 2

Смета на выполнение проектно-изыскательских работ

№	Показатели	Показатель	Расчет, руб.
1	Создание съемочной геодезической сети методом спутниковых геодезических определений пункт 38 таблица 2.1	1 категория $3948,55 \times 1,54 = 6\ 136,21$	6 136,21
2	Съемка искусственных сооружений методом НЛС плотностью точек лазерных отражений не менее 1000 точек на 1 кв. м пункт 47 таблица 2.7	1 км = 32 288,79 6,5 км $6,5 \times 32\ 288,79 = 209\ 877,13$ $209\ 877,13 \times 1,54 = 323\ 210,79$	323 210,79
3	Подготовка технического задания на выполнение съемочных работ пункт 52 таблица 3.1	$8\ 989,96 \times 1,54 = 13\ 844,54$	13 844,54
4	Подготовка программы на выполнение съемочных работ пункт 53 таблица 3.2	$47\ 053,83 \times 1,54 = 72\ 462,90$	72 462,90
5	Обработка результатов измерений, выполненных при создании съемочной геодезической сети методом спутниковых геодезических определений пункт 57 таблица 3.5	5 пунктов $5 \times 418,72 = 2\ 092,1$ $2\ 092,1 \times 1,54 = 3\ 223,37$	3 223,37
6	Камеральная обработка материалов топографической съемки линейного объекта методом МЛС протяженностью от 5 до 10 км включительно пункт 61 таблица 3.7	$18\ 633,30 \times 1,54 = 28\ 695,28$	28 695,28
7	Подготовка технического отчета на выполнение съемочных работ на территории площадью до 50 га включительно пункт 66 таблица 3.11	$20\ 279,60 \times 1,54 = 31\ 230,58$	31 230,58
8	Итого		478 803,67
9	НДС 20%		95 760,73
1	ВСЕГО		574 564,40

Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования.

Заключение

В рамках данной работы было проведено исследование по автоматизированной комплексной съемке объекта с использованием современных лазерных сканеров, что позволило получить высокоточные данные о геометрии и структуре помещений. Полученные результаты были интегрированы в специализированное программное обеспечение для построения трехмерной модели, обеспечивающей высокую степень детализации и визуализации архитектурных особенностей здания. В ходе исследования выявлено, что предлагаемое техническое решение сочетает в себе преимущества лазерного сканирования и обладает рядом функциональных преимуществ, что делает его особенно актуальным для широкого спектра задач:

– во-первых, позволяет создавать высокоточные 3D-модели сложных архитектурных сооружений, обеспечивая де-

тальное представление их пространственной структуры;

– во-вторых, открывает новые возможности для проведения изысканий в сложных или опасных для человека условиях, минимизируя риски для исследователя и повышая эффективность выполнения работ;

– в-третьих, значительно сокращает время, необходимое для проведения геодезических и картографических исследований, что способствует повышению производительности и снижению затрат на выполнение подобных задач.

Список литературы

1. Гурад.А., Марковский И.Г., Пшидаток С.К. Методика мониторинга объектов недвижимости с помощью трехмерного лазерного сканирования в специфике городских земель // Геодезия и картография. 2021. Т. 82. № 4. С. 45-53. DOI: 10.22389/0016-7126-2021-970-4-45-53. EDN: TSBMMW.

2. Пшидаток С.К., Турк Г.Г., Сарксян Л.Д., Лукьянова М.С. Инженерно-геодезические изыскания для целей подготовки проектной документации линейного объекта // Научная жизнь. 2022. Т. 17. № 2 (122). С. 206-218. DOI: 10.35679/1991-9476-2022-17-2-206-218. EDN: NXJSBY.

3. Туров Д.И., Гура Д.А., Шевченко Г.Г., Гура Т.А. Комплекс геодезических работ для составления пространственных обмерных чертежей подземных сооружений на примере ГЭС // Электронный сетевой политехнический журнал «Научные труды КубГТУ». 2017. № 4. С. 51-59. EDN: ZKAONX.
4. Gura D.A., Kuziakina M.V., Dubenko Yu. V. [et al.] Classification and Automatisation of Laser Reflection Points Processing in the Detection of Vegetation // Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology : Proceedings of the International Symposium “Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research” dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019), Groznyi, Russia, 12–13 июня 2019 года. Vol. 1. Groznyi, Russia: Atlantis Press, 2019. P. 593-596. EDN: TVCXYG.
5. Струсь С.С. Экономическое регулирование рационального использования земельных ресурсов, методы установления арендной платы за землю // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2009. № 16. С. 54-58. EDN: KGXLJP.
6. Савченко Ю.М. , Турк Г.Г., Гурский И.Н. Современные возможности использования фотограмметрии // Московский экономический журнал. 2024. Т. 9. № 1. DOI: 10.55186/2413046X_2023_9_1_49. EDN: BFWWII.
7. Савченко Ю.М., Турк Г.Г. Современные возможности лазерного сканирования // Московский экономический журнал. 2024. Т. 9. № 6. С. 632-642. DOI: 10.55186/2413046X_2024_9_6_311. EDN: CLRKWF.
8. BezuglovaE., Matsiy S., Podtelkov V. Landslide risk management at transport facilities // Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice: 12th, Napoli, 12–19 июня 2016 года. Vol. 2. 2016. P. 405-409. DOI: 10.1201/b21520-40. EDN: XFHQCL.
9. Струсь С.С., Пшидаток С.К., Подтелков В.В. К вопросу выбора метода проведения топографической съемки с учетом стоимости работ / С. С. Струсь, // Экономика и предпринимательство. 2020. № 11 (124). С. 1116-1119. DOI: 10.34925/EIP.2020.124.11.219. EDN: DWPKWA.
10. Подтелков В.В. , Прокопенко А.В., Зеленков Д.С., Пшидаток М.А. Проблемы устройства дорожного полотна на землях сельскохозяйственного назначения // Политехнический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2021. № 173. С. 180-192. DOI: 10.21515/1990-4665-173-012. EDN: NLRUWX.
11. Савченко Ю.М. , Турк Г.Г. Безопасность при производстве // Политехнический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2023. № 191. С. 61-75. DOI: 10.21515/1990-4665-191-013. EDN: ARDFZW.
12. Подтелков В.В., Прокопенко А.В., Зеленков Д.С., Пшидаток М.А. Оптимизация технических решений устройства оснований зданий и дорожных одежд предприятий первичной подработки и хранения сельскохозяйственной продукции // Политехнический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2022. № 175. С. 179-188. DOI: 10.21515/1990-4665-175-012. EDN: EDYTGW.
13. Патент № 2846749 С1 Российская Федерация, МПК G01N 21/88, F17D 5/02. Устройство для автоматического мониторинга состояния асбестоцементных водоподающих и водоотводящих трубопроводов закрытых оросительных систем: заявл. 09.08.2024: опубл. 15.09.2025 / С.К. Пшидаток, А.А. Солодунов, А.С. Ерж, М.К. Кузьменко; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина». EDN: WYHJZO.
14. Патент № 2819372 С1 Российская Федерация, МПК G06T 17/05, G05D 1/222, B62D 63/02. Устройство для получения 3D-моделей помещения: № 2023112964: заявл. 18.05.2023: опубл. 20.05.2024 / С.К. Пшидаток, А.А. Солодунов, А.С. Ерж, М.К. Кузьменко; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина». EDN: QDOUHZ.
15. Солодунов А.А. , Кузьменко М.К., Ерж А.С. Мобильная платформа для создания 3D-модели конструктивных элементов здания // Экономика и предпринимательство. 2024. № 5 (166). С. 1122-1126. DOI: 10.34925/EIP.2024.166.5.231. EDN: EGZXND.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

СТАТЬЯ

УДК 630*524.4
 DOI 10.17513/use.38458

ПРИМЕНЕНИЕ ВОЗДУШНОГО И НАЗЕМНОГО ЛИДАРНОГО СКАНИРОВАНИЯ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РАБОТ ПО ОТВОДУ И ТАКСАЦИИ ЛЕСОСЕК

¹Банников В.П., ¹Капиталинин Д.Ю., ²Карминов В.Н. ORCID ID 0000-0002-9298-956X,

²Митрофанов Е.М. ORCID ID 0000-0003-1957-7638, ³Фань Вэньи

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение «Рослесинфорг»,
 Москва, Российская Федерация, e-mail: banticore@mail.ru;

²Мытищинский филиал федерального государственного автономного образовательного
 учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени
 Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», Мытищи, Российская Федерация;

³Школа лесного хозяйства Северо-Восточного университета лесного хозяйства, Харбин, Китай

В статье проанализирована возможность использования воздушного и наземного лазерного сканирования при отводе и таксации лесосек. Объектом исследования альтернативного метода отвода и таксации лесосек стала территория Костромского сельского участкового лесничества Костромской области. Пять лесосек были отведены под сплошную рубку в соответствии с приказом Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 17.10.2022 № 688 общей площадью 8,9 га. Проведение полевых измерений выполнялось с использованием двух перспективных технологий: воздушного сканирования участков при помощи беспилотных летательных аппаратов и наземного сканирования участков при помощи slam-сканера. Разработан общий алгоритм работы с наземным лазерным сканером, включающий этапы: мобильный лазерный сканер приводят в рабочее положение рядом с исследуемым участком; специалист включает прибор; специалист выполняет мобильное сканирование объекта; после того как выполнены процедуры сканирования, в камеральных условиях происходит обработка полученных данных и формирование облака точек. Обработка облачных точек, полученных со сканера, выполнялась в специализированной программе (BMSTU-LIDAR). Анализ экспериментальных результатов показал, что по временным затратам проведение вышеуказанных работ «инновационным методом» более экономически привлекательно (уменьшение на 29%) и способно снизить финансовые затраты при увеличении объема работ, возникает возможность конкурировать начальной ценой за единицу работ по отношению к «классическому методу».

Ключевые слова: воздушное лазерное сканирование, наземное лазерное сканирование, лидар, облако точек, отвод и таксация лесосек, круговые площадки постоянного радиуса

Благодарности: Автор выражает благодарность коллективу кафедры ЛТЗ-МФ МГТУ имени Н.Э. Баумана за помощь в обработке результатов воздушного и наземного лазерного сканирования.

THE USE OF AERIAL AND GROUND-BASED LIDAR SCANNING DURING LOGGING AND TAXING OPERATIONS

¹Bannikov V.P., ¹Kapitalinin D.Yu., ²Karminov V.N. ORCID ID 0000-0002-9298-956X,

²Mitrofanov E.M. ORCID ID 0000-0003-1957-7638, ³Fan Wenyi

¹Federal State Budgetary Institution “Roslesinforg”,

Moscow, Russian Federation, e-mail: banticore@mail.ru;

²Mytischi Branch of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education

“Bauman Moscow State Technical University”, Moscow, Russian Federation;

³School of Forestry North-Eastern Forestry University, Harbin, China

The article analyzes the possibility of using aerial and ground-based laser scanning during logging and taxing. The object of research of an alternative method of allotment and taxation of cutting areas was the territory of the Kostroma rural district forestry of the Kostroma region. Five cutting areas were allocated for continuous logging in accordance with the order of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation dated 17.10.2022 No. 688 with a total area of 8.9 hectares. Field measurements were carried out using two promising technologies: aerial scanning of sites using unmanned aerial vehicles and ground scanning of sites using a slam scanner. A general algorithm for working with a ground-based laser scanner has been developed, including the following steps: the mobile laser scanner is brought into working position next to the test area; the specialist turns on the device; the specialist performs a mobile scan of the object; after the scanning procedures are completed, the received data is processed in the office and a point cloud is formed. Processing of cloud points received from the scanner was performed in a specialized program (BMSTU-LIDAR). An analysis of the experimental results showed that in terms of time costs, carrying out the above-mentioned work using the “innovative method” is more economically attractive (a decrease of 29%), and is able to reduce financial costs with an increase in the volume of work, it becomes possible to compete with the initial price for 1 unit of work in relation to the “classical method”.

Keywords: aerial laser scanning, ground-based laser scanning, lidar, point cloud, logging and taxing, circular sites of constant radius

Acknowledgements: The author expresses gratitude to the staff of the LT3-MF Department of the Bauman Moscow State Technical University for their help in processing the results of aerial and ground laser scanning.

Введение

Традиционные методы таксации лесонасаждений требуют значительных затрат как по времени сбора полевой информации, так и по дальнейшей ее камеральной обработке. В настоящее время, помимо традиционных способов таксации насаждений, все более широкое применение находят способы, основанные на технологических, дистанционных методах определения таксационных показателей, таких как воздушное лазерное сканирование (ВЛС) и наземный глазомерно-измерительный способ [1–3].

Цель исследования – оценка точности определения основных таксационных показателей при отводе и таксации лесосек при использовании воздушного и наземного лазерного сканирования.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования альтернативного метода отвода и таксации лесосек стала территория Костромского сельского участкового лесничества Костромской области. Пять лесосек общей площадью 8,9 га (рис. 1) были отведены под сплошную рубку в соответствии с приказом Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 17.10.2022 № 688. Характеристики лесосек, отведенных под сплошную рубку, представлены в табл. 1, а их пространственное размещение – на рис. 1.

Отвод производился методом сплошного перечета на четырех участках и методом закладки реласкопических площадок на одном участке [4].

Таблица 1
Характеристика лесосек, отведенных под сплошную рубку

№ лесосеки	№ квартала	№ выдела	Площадь, га	Возраст	Состав	Ликвидный запас на лесосеке, м ³
1	8	28	0,43	90	5Б2ОС2С1Е	154
2	22	22	1,51	110	3С2Е3Б2ОС	358
3	8	11	1,72	110	3С2Е3Б2ОС	388
4	8	15	1,38	85	5Б3ОС2С+Е	292
5	18	58	3,91	110	4Е1С4Б1ОС	769

Примечание: составлена на основе данных, полученных из материалов лесоустройства Костромского сельского участкового лесничества.

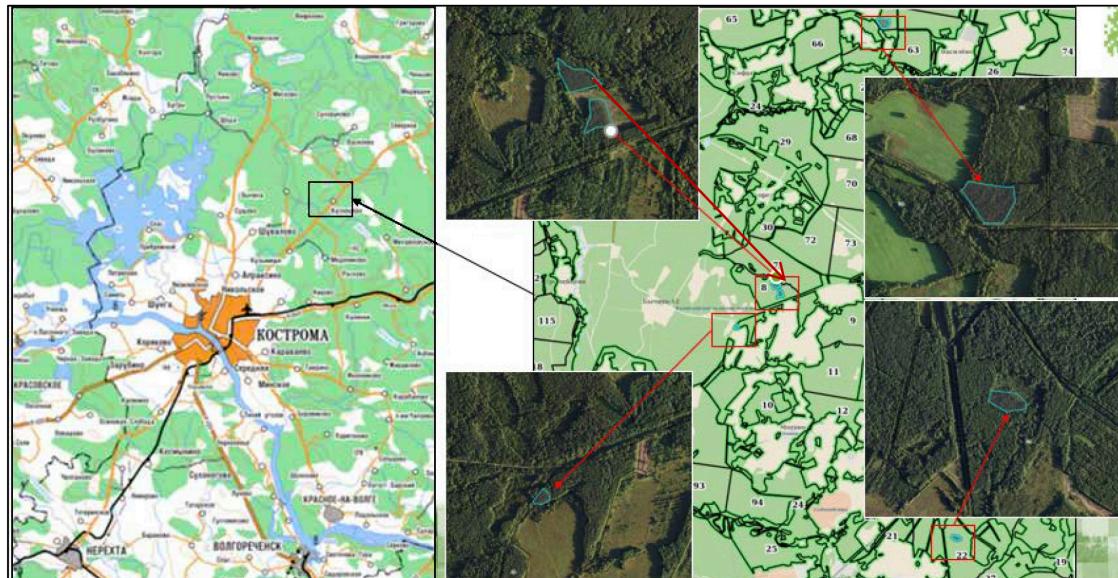


Рис. 1. Схема расположения участков
Примечание: составлен авторами по данным дистанционного зондирования и материалам лесоустройства

	<p>Геоскан 401: Продолжительность полета – до 60 мин. Максимальная протяженность маршрута – 24 км. Площадь съемки за 1 полет – до 2,1 км². Максимальная взлетная масса – 9,5 кг, масса полезной нагрузки – до 2 кг. Размер в сложенном виде – 70×25×20 см, в полетном – 150×150×43 Лидар – Лазерный сканер АГМ МС1.2</p>
---	--

Рис. 2. Технические характеристики БПЛА
Примечание: фото БПЛА Геоскан 401 сделано и дополнено
техническими характеристиками В.П. Банниковым

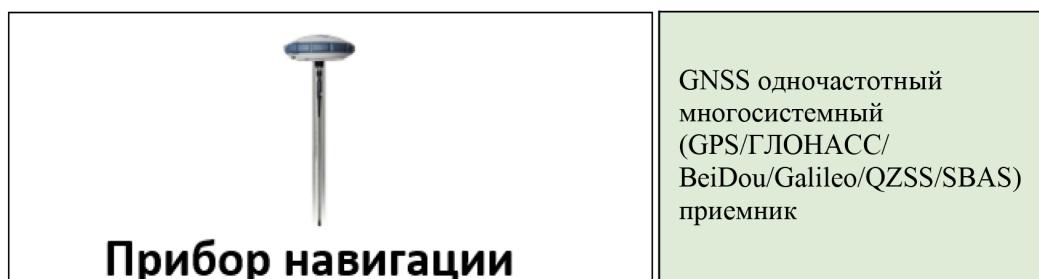


Рис. 3. GNSS одночастотный многосистемный
(GPS/ГЛОНАСС/BeiDou/Galileo/QZSS/SBAS) приемник
Источник: фото прибора навигации сделано В.П. Банниковым

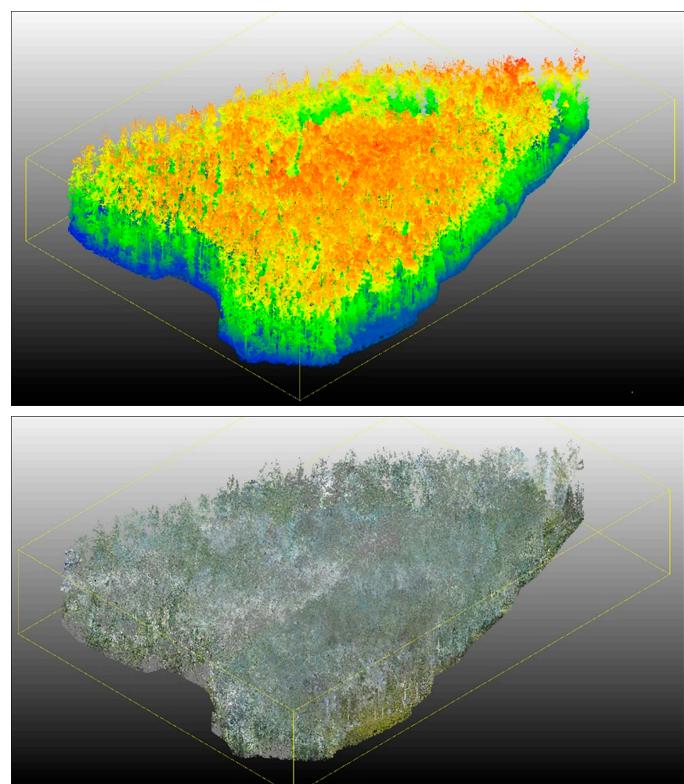


Рис. 4. Результат проведения съемки воздушным лазерным сканером (ВЛС)
Средняя плотность 100 точек/м²; Скорость съемки ориентировочно составляет ~1 мин/га
Примечание: составлен авторами по данным с опытных участков



Рис. 5. Получение плотного облака точек МЛС
Примечание: составлен авторами по данным с опытных участков

Проведение полевых измерений выполнялось с использованием двух перспективных технологий:

1) воздушного сканирования участков при помощи БПЛА;

2) наземного сканирования участков при помощи slam-сканера.

Воздушное сканирование (далее – ВЛС) проводилось беспилотным летательным аппаратом Геоскан 401 оснащенным лазерным сканером АГМ МС1.2 (рис. 2).

Время проведения сканирования состоит из следующих работ:

– подготовка БПЛА к полету (калибровка, проверка систем, подготовка полетного задания) ориентировочно составляет ~30–60 мин;

– сканирование в полете участка 1 га ориентировочно составляет ~1 мин.

Время и сроки использования воздушного судна заранее были согласованы с заинтересованными службами на два дня.

Для привязки к местности авторами был использован одночастотный GNSS-приемник, представленный на рис. 3. В результате съемки лесосек, отведенных в сплошную рубку, были получены облака точек лесных массивов, одно из которых приведено на рис. 4.

Также авторами были выполнены наземные исследования намеченных участков леса с применением мобильного лазерного сканера (МЛС) [5, 6] (рис. 5). Разработан общий алгоритм работы с наземным лазерным сканером, включающий этапы:

– мобильный лазерный сканер приводят в рабочее положение рядом с исследуемым участком;

– специалист включает прибор;

– специалист выполняет мобильное сканирование объекта;

– после того как выполнены процедуры сканирования, в камеральных условиях происходит обработка полученных данных и формирование облака точек [7–9].

Обработка облачных точек, полученных со сканера, выполнялась в специализированной программе BMSTU-LIDAR специалистами Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана [10].

Обработка данных мобильного лазерного сканирования (облака точек) – это процесс преобразования массива точек поверхности в трехмерной системе координат, полученного с помощью лазерного 3D-сканирования. Цель – создать цифровую модель объекта (насаждения), использовать данные для проектирования и анализа [11].

Таблица 2

Результаты обработки облачных точек, полученных со сканера

№ дерева	Диаметр (D), см	Высота (H), м	Порода	Ступень толщины
1	21,3	15,2	Б	20
2	24,3	13,5	С	24
3	29,0	26,2	Б	28
4	43,4	23,5	Б	44
5	24,3	17,5	С	24
6	15,9	19,7	Е	16
7	16,8	20,5	Б	16
8	27,0	19,9	С	28
9	34,5	30,6	Е	36
10	15,3	18,7	Б	16
11	31,4	25,0	Е	32
12	16,0	16,0	Б	16

Примечание: составлена авторами по части результатов обработки облака точек в программе BMSTU-LIDAR

Облака точек наземного лазерного сканирования имеют свои особенности:

- неупорядоченность, когда точки не связаны друг с другом и не образуют упорядоченную структуру, такую как сетка или полигоны.
- плотность – число точек в облаке может варьироваться в зависимости от разрешения сканера и расстояния до объекта. Более близкие объекты имеют большую плотность точек, чем удаленные.

Некоторые этапы обработки данных лазерного сканирования автоматизированы, а другие происходят только при участии оператора.

Некоторые этапы:

- предобработка – загрузка облака точек во внутренний формат представления, подготовка структур данных, например структур разбиения пространства, ускоряющих операции пространственного поиска [12, 13];
- обработка – применение алгоритмов обработки к загруженному облаку точек и подготовленным структурам данных. Алгоритмы могут включать фильтрацию шума, прореживание, классификацию, визуализацию и другие процедуры [14, 15].

Программное обеспечение

Для обработки данных лазерного сканирования используется специализированное программное обеспечение: BMSTU-LIDAR – комплекс модулей для обработки, моделирования и управления трехмерными облаками точек.

Также были использованы наработки искусственной нейронной сети для опре-

деления основных таксационных показателей древостоя (порода, диаметр и высота) [16–18] (табл. 2).

Время на комплексную обработку 1 га лесного массива составило примерно 3–4 ч.

Результаты исследования и их обсуждение

Результатом обработки облаков точек, полученных при наземном лазерном сканировании, стали данные о ликвидном запасе древесины, представленные на рис. 6–10 (все рисунки подготовлены авторами по результатам обработки опытных материалов).

В табл. 3 приведены результаты сравнения точности определения ликвидного запаса насаждений при классическом отводе и таксации насаждений, и при инновационном методе (ВЛС и МЛС) [19].

Анализ данных табл. 3 показал, что при инновационном методе отвода и таксации лесосек на всех пяти лесосеках запас деловой древесины выше. Расхождение составило 89 м³. Запас, определенный инновационным методом, выше в связи с тем, что при наземном лазерном сканировании «строитель» модельные деревья, которые приближены к реальным. Арендная плата за древесину в большей степени зависит от ставок платы за единицу объема лесных ресурсов, величина которых зависит от ставки платы за плотный кубический метр деловой древесины (по категориям крупности: крупная, средняя и мелкая) и дровяной. Поэтому поступления в бюджет будут выше.

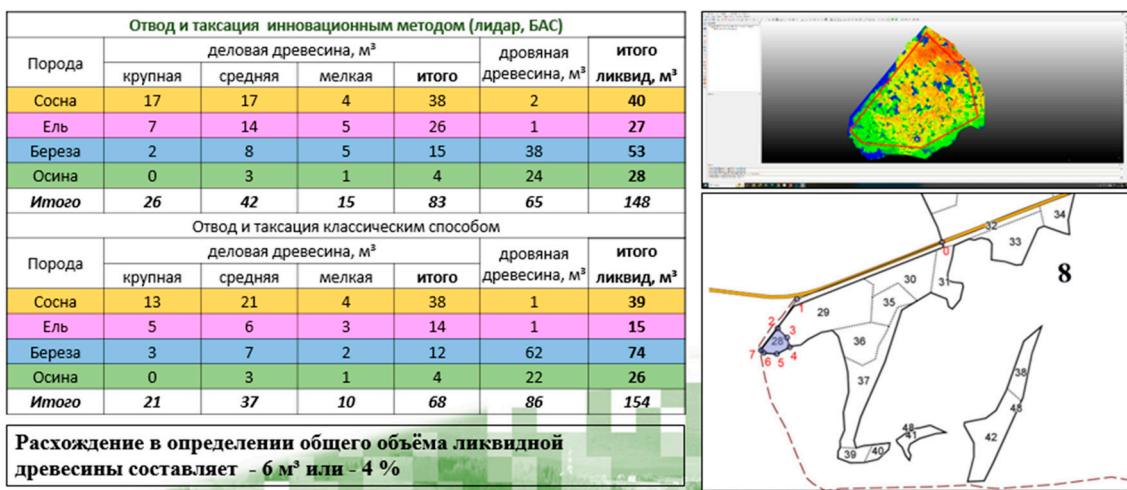


Рис. 6. Результаты обработки и сравнения данных, полученных при классическом отводе и таксации и инновационном методе (ВЛС и МЛС) на лесосеке № 1

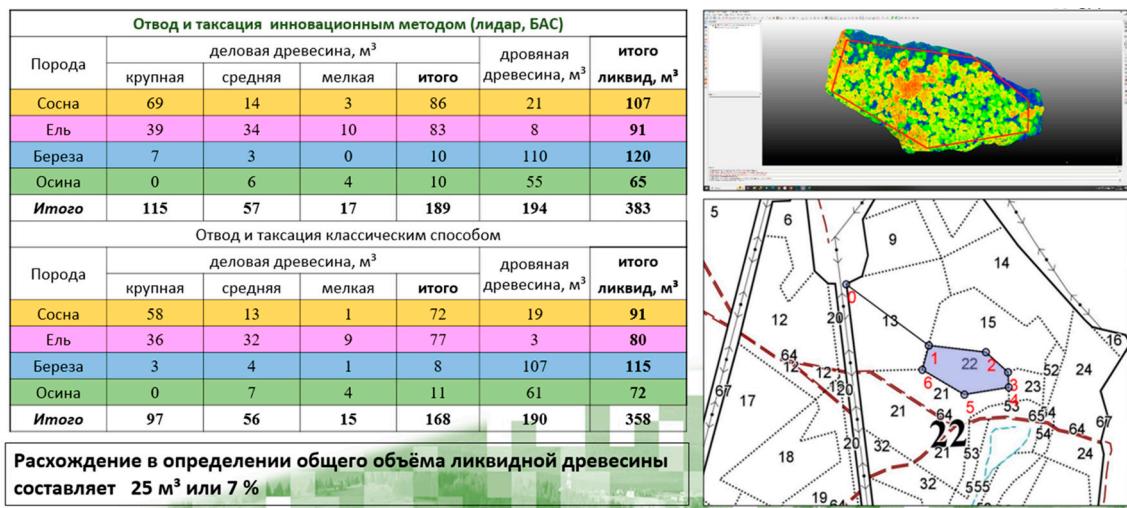


Рис. 7. Результаты обработки и сравнения данных, полученных при классическом отводе и таксации и инновационном методе (ВЛС и МЛС) на лесосеке № 2

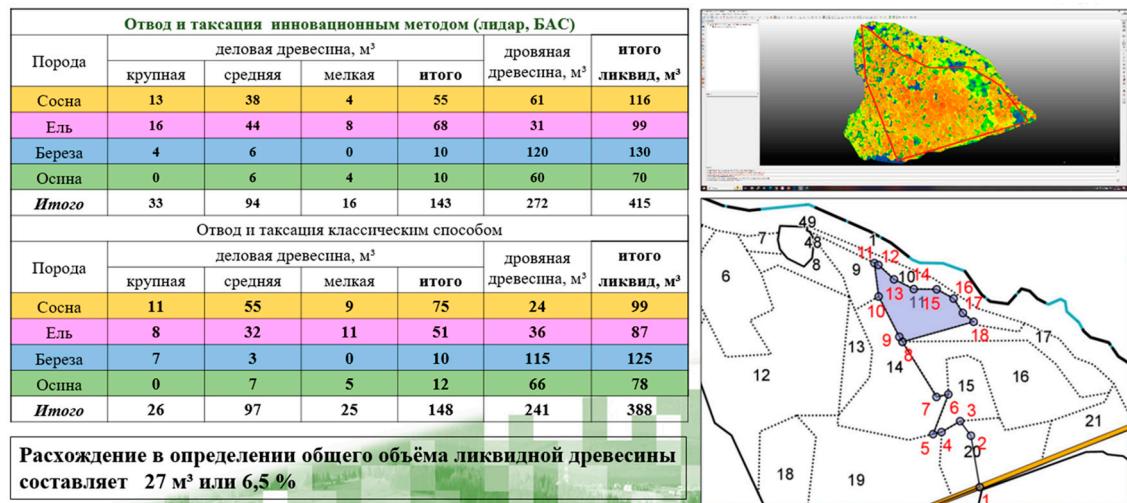


Рис. 8. Результаты обработки и сравнения данных, полученных при классическом отводе и таксации и инновационном методе (ВЛС и МЛС) на лесосеке № 3

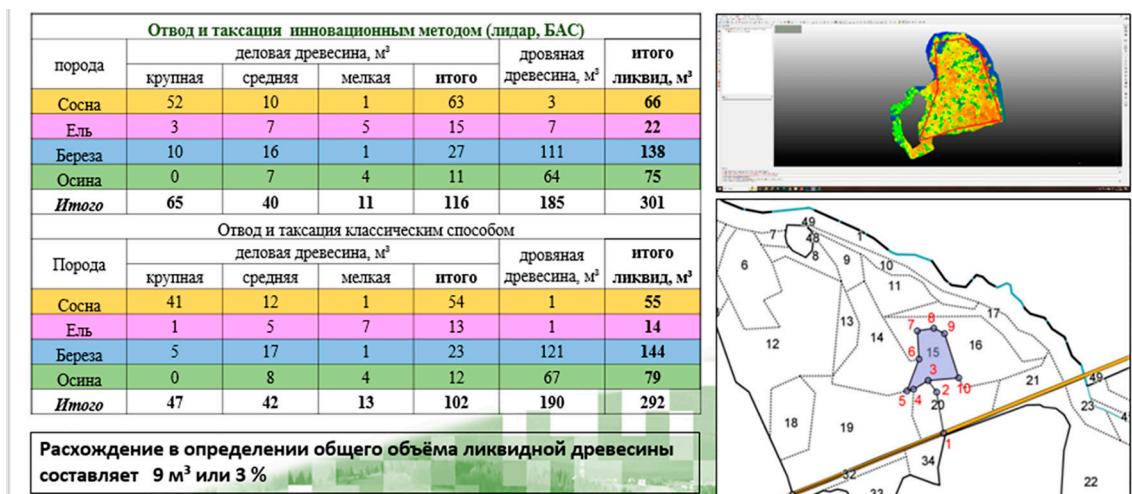


Рис. 9. Результаты обработки и сравнения данных, полученных при классическом отводе и таксации и инновационном методе (ВЛС и МЛС) на лесосеке № 4

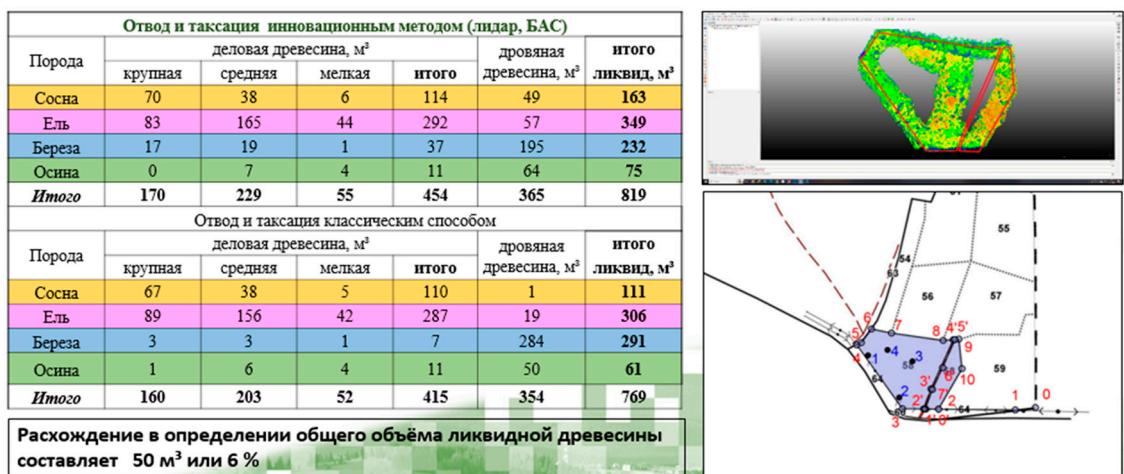


Рис. 10. Результаты обработки и сравнения данных, полученных при классическом отводе и таксации и инновационном методе (ВЛС и МЛС) на лесосеке № 5

Важным критерием принятия новых технологий или отказа от них является экономический показатель, в частности экономическая эффективность. Расчеты авторов по данным отвода и таксации лесосек на территории Костромской области показали, что примерная стоимость работ по отводу и таксации лесосек при проведении сплошных рубок составляет около 10 тыс. руб. за 1 га. Соответственно, на экспериментальную площадь в 9 га стоимость составила 90 тыс. руб.

Текущие расчеты экономической эффективности проводились без учета стоимости приборов, а заработная плата сотрудников за 1 рабочий день была принята ориентировочно 5000 руб. (при классическом методе),

ориентировочно 7500 руб. (при инновационном методе), при проведении камеральных работ была принята ориентировочно 3500 руб. (при классическом методе), ориентировочно 4000 руб. (при инновационном методе). Также не учитывались НДС и остальные налоговые издержки.

Учитывая вышеизложенное, следует отметить, что по времененным затратам, проведение вышеуказанных работ «инновационным методом» более экономически привлекательно (уменьшение на 29 %), и способно снизить финансовые затраты при увеличении объема работ, возникает возможность конкурировать начальной ценой за 1 единицу работ по отношению к «классическому методу» [20, 21].

Таблица 3

Результаты сравнения точности определения ликвидного запаса насаждений при классическом отводе и таксации и инновационном методе (ВЛС и МЛС)

Метод	Деловая древесина, м ³			Дровяная древесина, м ³	Итого ликвид, м ³
	крупная	средняя	мелкая		
Лесосека 1, квартал 8, выдел 28, площадь – 0,43 га					
Инновационный (ВЛС и МЛС)	26	39	14	79	69
Классический	21	34	9	64	90
Расхождение 4%					-6
Лесосека 2, квартал 22, выдел 22, площадь – 1,51 га					
Инновационный (ВЛС и МЛС)	115	51	13	179	204
Классический	97	49	11	157	201
Расхождение 7%					25
Лесосека 3, квартал 8, выдел 11, площадь – 1,72 га					
Инновационный (ВЛС и МЛС)	33	88	12	133	282
Классический	26	90	19	135	253
Расхождение 7%					27
Лесосека 4, квартал 8, выдел 15, площадь – 1,38 га					
Инновационный (ВЛС и МЛС)	65	33	7	105	196
Классический	47	34	9	90	202
Расхождение 3%					9
Лесосека 5, квартал 18, выдел 58, площадь – 3,91 га					
Инновационный (ВЛС и МЛС)	170	229	55	454	365
Классический	160	203	52	415	354
Расхождение 6,5%					50
Все участки площадь – 8,95 га					
Инновационный (ВЛС и МЛС)	409	440	101	950	1116
Классический	351	410	100	861	1100
Расхождение 5%					105

Примечание: составлена авторами по результатам точности определения ликвидного запаса насаждений при классическом отводе и таксации и инновационном методе (ВЛС и МЛС)

Таблица 4

Финансовые затраты на отведение пяти лесосек общей площадью 9 га

Метод	Полевые работы			Камеральные работы			Итого		
	количество сотрудников	количество рабочих дней	заработная плата, руб.	количество сотрудников	количество рабочих дней	заработная плата, руб.	количество сотрудников	количество рабочих дней	заработная плата
Инновационный метод	2	2	30000	1	3	12000	3	5	42000
Классический метод	2	5	50000	1	2	7000	3	7	57000

Таблица 5

Положительные и отрицательные моменты использования инновационного метода отвода и таксации лесосек

Использование инновационного метода отвода и таксации лесосек	
Положительные моменты	Отрицательные моменты
1. Сокращение временных затрат. 2. Точность определения таксационных характеристик. 3. Экономическая эффективность при проведении работ. 4. Возможность ускоренной подготовки данных по отводу и таксации лесосек в Федеральную геоинформационную систему лесного комплекса (ФГИС ЛК) (возможно при разработке специализированного софта с последующей интеграцией). 5. Подготовка и контроль данных для бортового компьютера-харвестера (возможно при разработке специализированного софта с последующей интеграцией). 6. Многофункциональность использования оборудования. 7. Возможность использования оборудования как совместно, так и раздельно	1. Стоимость оборудования (на 2025 г.). 2. Согласование полета со службами (временные неудобства, не несущие финансовых затрат). 3. Погодные условия: снег, дождь (относится к наземному сканеру) и скорость ветра более 10 м/с (относится к БАС). 4. Отсутствие единого программного продукта для обработки данных и получения выходного материала.

Вывод: стоимость работ по отводу и таксации лесосек при проведении сплошных рубок «инновационным методом» на территории Костромской области ориентировочно можно снизить до 8500 руб. за 1 га. В табл. 4 представлены финансовые затраты на все пять отведенных лесосек общей площадью 9 га.

Анализ использования инновационного метода отвода и таксации лесосек позволил выявить положительные и отрицательные моменты, представленные в табл. 5.

Заключение

Отвод и таксация лесосек – один из самых трудоемких и требующих точности видов лесохозяйственных работ. Современные системы наземного и воздушного сканирования позволяют не только снизить трудоемкость работ, но и повысить точность определения таксационных показателей, одним из которых является ликвидный запас насаждений. О повышении точности свидетельствуют результаты сравнения точности определения ликвидного запаса насаждений при классическом отводе и таксации, и инновационном методе (ВЛС и МЛС). Анализ положительных и отрицательных моментов использования инновационного метода отвода и таксации лесосек подтверждает пригодность, но только при внесении соответствующих изменений в законодательные акты РФ и дальнейшего развития данного метода.

Список литературы

1. Ковязин В.Ф., Виноградов К.П., Киценко А.А., Васильева Е.А. Воздушное лазерное сканирование для уточнения таксационных характеристик древостоев // Известия вузов. Лесной журнал. 2020. Вып. 6. С. 42–54. DOI: 10.37482/0536-42-542020-6-42-54.
2. Шайтура С.В., Шайтура Н.С., Митрофанов Е.М., Мухин А.С., Устинов С.М. Применение наземных лазерных сканеров для мониторинга леса // Природообустройство. 2024. № 3. С. 124–132. DOI: 10.26897/1997-6011-2024-4-124-132.
3. Усольцев В.А. Лазеры в лесном деле: монография. Киров: Изд-во МЦИТО, 2025. 299 с. ISBN: 978-5-907974-80-7. [Электронный ресурс]. URL: <https://s.erudit.org/fe/4456260/> (дата обращения: 15.09.2025).
4. Филипчук А.Н., Малышева Н.В., Золина Т.А., Федоров С.В., Бердов А.М., Косицын В.Н., Югов А.Н., Кинигопуло П.С. Аналитический обзор количественных и качественных характеристик лесов Российской Федерации: итоги первого цикла государственной инвентаризации лесов // Лесохозяйственная информация. 2022. № 1. С. 5–34. DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2022.1.01.
5. Кравченко П.П., Бурцев Д.С. Цифровые технологии в лесной промышленности: перспективы и барьеры // Вопросы инновационной экономики. 2022. Т. 12. № 2. С. 1029–1050. DOI: 10.18334/vinec.12.2.114874.
6. Данилин И.М., Лапко В.А., Кузнецов А.А., Бабий И.А., Вайсман А.О. Инновационный учебно-научный центр мониторинга лесных ресурсов Сибири на основе лазерной и микроволновой аэрокосмической съемки // Сибирский аэрокосмический журнал. 2024. Т. 25. № 1. С. 8–17. DOI: 10.31772/2712-8970-2024-25-1-8-17.
7. Ченушкина С.В., Кручинин И.Н. 3D-моделирование лесотранспортной сети в условиях цифровой трансформации лесного хозяйства // Тенденции развития науки и образования. 2022. Т. 88. № 3. С. 158–160. DOI: 10.18324/2077-5415-2022-4-132-137.
8. Черниховский Д.М. Теория и методы инвентаризации лесов на основе данных дистанционного зондирования земли, цифрового моделирования рельефа и ГИС-технологий: дис. ... докт. сельхоз. наук. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, 2020. 386 с. URL: <https://spbftu.ru/wp-content/uploads/2019/12/Dissertaziya-ChernikhovskijDM.pdf> (дата обращения: 20.09.2025).
9. Tompalski P., White J.C., Coops N.C., Wulder M.A. Demonstrating the transferability of forest inventory attribute models derived using airborne laser scanning data // Remote Sensing of Environment. 2019. Vol. 227. P. 110–124. DOI: 10.1016/j.rse.2019.04.006. Лицензия CC BY-NC-ND 4.0.
10. Dong P., Chen Q. LiDAR remote sensing and applications. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2018. 200 p. Annals of GIS. URL: <https://www.routledge.com/LiDAR-Remote-Sensing-and-Applications/Dong-Chen/p/book/9781138747241> (дата обращения: 15.09.2025). DOI: 10.1080/194756683.2018.1471522. ISBN: 9781138747241.
11. Беляевский К.О. Методы и алгоритмы формирования использования октодерева для обработки облака точек лазерного сканирования в ограниченном объеме оперативной памяти: дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2020. 204 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.dissercat.com/content/metody-i-algoritmy-formirovaniya-i-ispolzovaniyu-oktoderiva-dlya-obrabotki-oblaka-tochek-laz> (дата обращения: 24.09.2025).
12. Разжигаева О.А., Воробьев И.Б., Громов А.М., Моисеев П.А., Нагимов З.Я. Особенности формирования древостоев в экотоне лес – горная тундра (г. Дальний Таганай, Южный Урал) // Леса России и хозяйство в них. 2024. № 2 (89). С. 48–57. DOI: 10.51318/FRET.2024.89.2.006.
13. Tkacheva A.A., Danilin I.M. The use of laser scanning data for modelling forest landscape scenes // J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol. 2017. № 10 (6). P. 727–740. DOI: 10.17516/1999-494X-2017-10-6-727-740.
14. Favorskaya M.N., Tkacheva A.A., Danilin I.M., Medvedev E.M. Fusion of airborne LiDAR and digitalphotography data for tree crowns segmentation and measurement InIntelligent Interactive Multimedia Systemsand Services. Smart Innovation, Systems & Technologies. Vol. 40 / E. Damiani, R.J. Howlett, L.C. Jain, L. Gallo, G. De Pietro (Eds.). Springer Int. Publ., Switzerland, 2015. P. 191–201. DOI: 10.1007/978-3-319-19830-9_18.
15. Госьков Е.А., Воробьева Т.С., Воробьев И.Б. Лазерное сканирование в исследовании структуры древостоев верхней границы леса на южном Урале // Леса России и хозяйство в них. 2022. № 2 (81). С. 4–10. DOI: 10.51318/FRET.2022.63.84.001.
16. Беляев Н.Л., Сафаргалиева С.Ф. Новейшие технологии в таксации заготовленных лесоматериалов как элемент промышленного лесного хозяйства // Лесной вестник. 2020. Т. 24. № 3. С. 18–25. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-3-18-25.
17. Побединский В.В., Теринов Н.Н., Кручинин И.Н., Берстенев А.В., Чевардина А.Ю., Ковалев Р.Н. Нейросетевая технология моделирования таксационных показателей лесоматериалов // Системы. Методы. Технологии. 2024. № 1 (61). С. 72–79. DOI: 10.18324/2077-5415-2024-1-72-79.
18. Мельников А.В., Полищук Ю.М., Русанов М.А., Аббазов В.Р., Кочергин Г.А., Куприянов М.А., Байсалямова О.А.,

- Соколов О.И. Сравнительный анализ нейросетевых моделей для картографирования лесных рубок по летним космическим снимкам // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2024. Т. 24. № 5. С. 806–814. DOI: 10.17586/2226-1494-2024-24-5-806-814.
19. Юнсон Э.В. Мониторинг лесного хозяйства с помощью беспилотных летательных систем // Международный научно-исследовательский журнал. 2024. № 5 (143). URL: <https://research-journal.org/archive/5-143-2024-may/10.60797/IRJ.2024.143.52> (дата обращения: 20.10.2025). DOI: 10.60797/IRJ.2024.143.52.
20. Звягинцев В.Б., Малашевич Д.Г., Жданович С.А. Перспективы использования беспилотных летательных аппаратов в лесном хозяйстве для проведения лесозащитных мероприятий // Труды БГТУ. Сер. 5. Экономика и управление. 2023. № 2 (274). С. 43–49. DOI: 10.52065/2520-6877-2023-274-2-6.
21. Листова М.А. Проблемы, возникающие при формировании расчетов стоимости лесосечных работ подготовительного цикла строительства и реконструкции объектов нефтегазового комплекса в Российской Федерации // Экспозиция Нефть Газ. 2020. № 5. С. 92–98. DOI: 10.24411/2076-6785-2020-10104.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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