



ИД «Академия Естествознания»

УСПЕХИ СОВРЕМЕННОГО ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

Научный журнал

№ 8 2026



ADVANCES IN CURRENT NATURAL SCIENCES

Scientific journal

No. 8 2026



PH Academy of Natural History

Успехи современного естествознания

Научный журнал

Журнал издается с 2001 года.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство – ПИ № ФС 77-63398 от 16.10.2015.

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

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

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

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

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

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

Технический редактор

Доронкина Е. Н.

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ

Бизенкова Мария Николаевна, к.м.н.

Корректор

Галенкина Е. С.,
Дудкина Н. А.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

д.х.н., к.ф.-м.н., проф. **Алоев В. З.** (Нальчик); д.г.н., доцент **Андреева Е. С.** (Ростов-на-Дону); д.с.-х.н., доцент **Анищенко Л. Н.** (Брянск); д.т.н., проф. **Бейсембаев К. М.** (Караганда); д.б.н., доцент **Белоус О. Г.** (Сочи); д.г.-м.н., к.т.н., проф. **Бондарев В. И.** (Екатеринбург); д.г.-м.н., проф. **Гавришин А. И.** (Новочеркасск); д.т.н., профессор **Галкин А. Ф.** (Якутск); д.с.-х.н. **Горянин О. И.** (Самара); д.с.-х.н., доцент **Григорьев М. Ф.** (Кемерово); д.с.-х.н., проф. **Данилин И. М.** (Красноярск); д.х.н., проф. **Дресвянников А. Ф.** (Казань); д.с.-х.н., проф. **Залесов С. В.** (Екатеринбург); д.б.н., доцент **Захарченко А. В.** (Тюмень); д.г.-м.н., доцент **Копылов И. С.** (Пермь); д.с.-х.н., проф. **Костылев П. И.** (Зерноград); д.с.-х.н. **Коцарева Н. В.** (Белгород); д.б.н., проф. **Ларионов М. В.** (Саратов); д.ф.-м.н., проф. **Лерер А. М.** (Ростов-на-Дону); д.г.н., к.б.н., проф. **Луговской А. М.** (Москва); д.т.н., проф. **Мусаев В. К.** (Москва); д.с.-х.н. **Никитин С. Н.** (Ульяновск); д.с.-х.н., доцент **Сокольская О. Б.** (Саратов); д.т.н., проф. **Степанов В. В.** (Санкт-Петербург); д.т.н. **Теплухин В. К.** (Октябрьский); д.с.-х.н., проф. **Титов В. Н.** (Саратов); д.т.н., доцент **Ульрих Е. В.** (Кемерово); д.ф.-м.н., проф. **Ширанов Д. Ш.** (Улан-Удэ); д.г.-м.н., проф. **Юргенсон Г. А.** (Чита); д.г.н., проф. **Яковенко Н. В.** (Воронеж); д.т.н., проф. **Ямалетдинова К. Ш.** (Уфа).

ISSN 1681-7494

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

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

Двухлетний импакт-фактор РИНЦ = 0,976

Пятилетний импакт-фактор РИНЦ = 0,458

Периодичность

12 номеров в год

Учредитель, издатель и редакция

ООО ИД «Академия Естествознания»

Почтовый адрес

105037, г. Москва, а/я 47

Адрес редакции и издателя

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

Типография

ООО «НИЦ Академия Естествознания»
410035, г. Саратов, ул. Мамонтовой, 5

E-mail

edition@rae.ru

Телефон

+7 (499) 705-72-30

Подписано в печать

31.08.2026

Дата выхода номера

30.09.2026

Формат

60х90 1/8

Усл. печ. л.

6

Тираж

1000 экз.

Заказ

УСЕ 2026/8

Распространяется по свободной цене

© ООО ИД «Академия Естествознания»

Advances in current natural sciences

Scientific journal

The journal has been published since 2001.

The journal is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Communications. **Certificate – PI No. FS 77-63398** dated October 16, 2015.

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

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

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

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

CHIEF EDITOR

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

Technical editor

Doronkina E. N.

EXECUTIVE SECRETARY

Bizenkova Maria Nikolaevna, Cand. Sci. (Medical)

Corrector

Galenkina E. S.,

Dudkina N. A.

EDITORIAL BOARD

D.Sc., C.Sc., Prof. **Aloev V.Z.** (Nalchik); D.Sc., Docent **Andreeva E.S.** (Rostov-on-Don); D.Sc., Docent **Anishchenko L.N.** (Bryansk); D.Sc., Prof. **Beisembaev K.M.** (Karaganda); D.Sc., Docent **Belous O.G.** (Sochi); D.Sc., C.Sc. Prof. **Bondarev V.I.** (Ekaterinburg); D.Sc., Prof. **Gavrilshin A.I.** (Novocherkassk); D.Sc., Prof. **Galkin A.F.** (Yakutsk); D.Sc. **Goryanin O.I.** (Samara); D.Sc., Docent **Grigoriev M.F.** (Kemerovo); D.Sc., Prof. **Danilin I.M.** (Krasnoyarsk); D.Sc., Prof. **Dresvyannikov A.F.** (Kazan); D.Sc., Prof. **Zalesov S.V.** (Ekaterinburg); D.Sc., Docent **Zakharchenko A.V.** (Tyumen); D.Sc., Docent **Kopylov I.S.** (Perm); D.Sc., Prof. **Kostylev P.I.** (Zernograd); D.Sc. **Kotsareva N.V.** (Belgorod); D.Sc., Prof. **Larionov M.V.** (Saratov); D.Sc., Prof. **Lerer A.M.** (Rostov-on-Don); D.Sc., C.Sc. Prof. **Lugovskoy A.M.** (Moscow); D.Sc., Prof. **Musaev V.K.** (Moscow); D.Sc. **Nikitin S.N.** (Ulyanovsk); D.Sc., Docent **Sokolskaya O.B.** (Saratov); D.Sc., Prof. **Stepanov V.V.** (Saint Petersburg); D.Sc. **Teplukhin V.K.** (Oktyabr'skiy); D.Sc., Prof. **Titov V.N.** (Saratov); D.Sc., Docent **Ulrich E.V.** (Kemerovo); D.Sc., Prof. **Shirapov D.Sh.** (Ulan-Ude); D.Sc., Prof. **Yurgenson G.A.** (Chita); D.Sc., Prof. **Yakovenko N.V.** (Voronezh); D.Sc., Prof. **Yamaletdinova K.Sh.** (Ufa).

ISSN 1681-7494

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

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

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

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

Periodicity

12 issues per year

Founder, publisher and editors

LLC PH Academy of Natural History

Mailing address

105037, Moscow, p.o. box 47

Editorial and publisher address

440026, Penza region, Penza, Moskovskaya st., bldg. 27

Printing house

LLC SPC Academy of Natural History
410035, Saratov, st. Mamontova, 5

E-mail

edition@rae.ru

Telephone

+7 (499) 705-72-30

Signed for print

31.08.2026

Number issue date

30.09.2026

Format

60x90 1/8

Conditionally printed sheets

6

Circulation

1000 copies

Order

YCE 2026/8

Distribution at a free price

© LLC PH Academy of Natural History

СОДЕРЖАНИЕ

Сельскохозяйственные науки (4.1.1 Общее земледелие и растениеводство)

СТАТЬЯ

ВЛИЯНИЕ МЕЖДУРЯДНЫХ ОБРАБОТОК НА ПРОДУКТИВНОСТЬ
ПОДСОЛНЕЧНИКА В УСЛОВИЯХ НЕУСТОЙЧИВОГО УВЛАЖНЕНИЯ

Авдеенко И. А., Каменев Р. А. 6

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

СТАТЬЯ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЛИСТЬЕВ БЕРЕЗЫ ПОВИСЛОЙ
В МЕСТООБИТАНИЯХ ЛИШАЙНИКОВ СЕВЕРНОЙ КАРЕЛИИ

Катаева М. Н., Беляева А. И. 13

Географические науки (1.6.8, 1.6.12, 1.6.13, 1.6.21)

СТАТЬЯ

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ КАЧЕСТВА
ВОДЫ РЕКИ МОСКВЫ: ОТ АНАЛИЗА СТРУКТУРЫ ДАННЫХ
К ПРОГНОЗИРОВАНИЮ

Никитин М. В., Розенталь О. М. 19

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

СТАТЬЯ

ПРОГНОЗНЫЕ РЕСУРСЫ ХОЙТО-АГИНСКОГО МАРГАНЦЕВОГО
УЗЛА АКША-ИЛИНСКОЙ СЕРИИ (ВОСТОЧНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ)

Соловьев А. Н., Соловьева Л. М., Чекушина Т. В. 30

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

СТАТЬЯ

МОНИТОРИНГ ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ВДОЛЬ
ОРОСИТЕЛЬНОГО КАНАЛА МЕТОДОМ ВРЕМЕННОЙ
РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Чжан Х., Кузнецов Э. Д., Хань Ц. 38

CONTENTS

Agricultural Sciences (4.1.1 General Agriculture and Plant Growing)

ARTICLE

INFLUENCE OF INTER-ROW CULTIVATION ON SUNFLOWER
YIELD UNDER VARIABLE MOISTURE CONDITIONS

Avdeenko I. A., Kamenev R. A.6

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

ARTICLE

DETERMINATION OF LEAF PARAMETERS OF SILVER
BIRCH IN LICHEN HABITATS OF NORTH KARELIA

Kataeva M. N., Belyaeva A. I.13

Geographical sciences (1.6.8, 1.6.12, 1.6.13, 1.6.21)

ARTICLE

SPATIOTEMPORAL VARIABILITY OF WATER QUALITY
IN THE MOSKVA RIVER: FROM DATA STRUCTURE
ANALYSIS TO FORECASTING

Nikitin M. V., Rozental O. M.19

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)

ARTICLE

PROJECTED RESOURCES OF THE KHOITO-AGINSKY
MANGANESE NODE OF THE AKSHA-ILINSKY SERIES
(EASTERN TRANSBAIKALIA)

Solovev A. N., Soloveva L. M., Chekushina T. V.30

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

ARTICLE

MONITORING OF GROUND SURFACE DEFORMATIONS
ALONG AN IRRIGATION CANAL USING TIME-DOMAIN
RADAR INTERFEROMETRY

Zhang Kh., Kuznetsov E. D., Khan Ts.38

СТАТЬЯ

УДК 633.854.78:631.51
DOI 10.17513/use.38538



CC BY 4.0

ВЛИЯНИЕ МЕЖДУРЯДНЫХ ОБРАБОТОК НА ПРОДУКТИВНОСТЬ ПОДСОЛНЕЧНИКА В УСЛОВИЯХ НЕУСТОЙЧИВОГО УВЛАЖНЕНИЯ

Авдеенко И. А. ORCID ID 0000-0001-7111-7933,
Каменев Р. А. ORCID ID 0000-0003-0725-2190

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Донской государственный аграрный университет»,
Персиановский, Российская Федерация, e-mail: irinaawdeenko@yandex.ru*

Подсолнечник – основная масличная культура России, и повышение его продуктивности является главной задачей производства. Анализ литературных источников показал, что урожайность культуры зависит от обработки почвы. Цель исследования – установить влияние междурядных обработок на продуктивность подсолнечника гибрида Имми при возделывании по технологии Clearfield® в условиях неустойчивого увлажнения Нижнего Дона. Опыты проводили с 2021 по 2023 г. на черноземе обыкновенном в УНПК учхоз «Донское» Октябрьского района Ростовской области. Схема включала три варианта: без междурядных обработок (контроль), одна обработка в фазу 1–2 пар листьев на 6–8 см и две обработки (первая – так же, вторая через неделю на 8–10 см) с последующим внесением гербицида Евро-Лайтнинг. Установлено положительное влияние увеличения количества междурядных обработок, обеспечивающих практически полностью чистые от сорняков посевы подсолнечника. Механическая обработка междурядий незначительно снижает сохранность растений к уборке, однако рыхление верхнего слоя почвы и улучшение условий произрастания растений оказывает непосредственное влияние на увеличение показателей структуры урожая: диаметр корзинки и ее выполненность, что полностью компенсирует потери растений подсолнечника от обработки междурядий. Повышение урожайности подсолнечника и общего сбора масла отмечено на варианте с применением двух междурядных обработок. На данном варианте совокупные энергетические затраты на возделывание культуры возрастают, однако полностью компенсируются увеличением ее продуктивности, что обеспечивает высокую эффективность применяемой технологии. По результатам трехлетних исследований на черноземе обыкновенном в условиях неустойчивого увлажнения Нижнего Дона при возделывании подсолнечника гибрида Имми по технологии Clearfield® наибольшая урожайность и сбор масла отмечены на варианте с двумя междурядными обработками до применения гербицида.

Ключевые слова: подсолнечник, технология Clearfield, междурядные обработки почвы, неустойчивое увлажнение, структура урожая, урожайность, биоэнергетическая эффективность

INFLUENCE OF INTER-ROW CULTIVATION ON SUNFLOWER YIELD UNDER VARIABLE MOISTURE CONDITIONS

Avdeenko I. A. ORCID ID 0000-0001-7111-7933,
Kamenev R. A. ORCID ID 0000-0003-0725-2190

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
“Don State Agrarian University”,
Persianovsky, Russian Federation, e-mail: irinaawdeenko@yandex.ru*

Sunflower is the primary oilseed crop in Russia, and enhancing its productivity is a key objective of agricultural production. A review of the literature has indicated that crop yield depends on soil cultivation practices. The aim of this research was to determine the effect of inter-row cultivation on the productivity of the sunflower hybrid Immi grown under the Clearfield® technology in the conditions of unstable moisture in the Lower Don region. Field experiments were conducted from 2021 to 2023 on ordinary chernozem at the Educational and Research Production Center of the Don State Agrarian University, “Donskoye” Training Farm, Oktyabrsky District, Rostov Region. The experimental design included three variants: no inter-row cultivation (control), a single cultivation at the 1-2 leaf pair stage to a depth of 6-8 cm, and two cultivations (the first performed as described above, and the second one week later to a depth of 8-10 cm) followed by the application of the herbicide Euro-Lightning. A positive effect of increasing the number of inter-row cultivations was established, ensuring virtually weed-free sunflower crops. Mechanical inter-row cultivation slightly reduced plant survival at harvest; however, loosening of the upper soil layer and improvement of plant growing conditions had a direct positive effect on yield structure components, namely head diameter and seed fill rate, which fully compensated for the loss of sunflower plants caused by inter-row cultivation. An increase in sunflower yield and total oil yield was observed in the variant with two inter-row cultivations. In this variant, the total energy input for crop cultivation increases; however, this is fully offset by the rise in productivity, ensuring the high efficiency of the applied technology. Based on the results of a three-year field study conducted on ordinary chernozem soil under conditions of unstable moisture supply in the Lower Don region, the cultivation of sunflower hybrid Immi using the Clearfield® technology demonstrated that the highest seed yield and oil yield were achieved in the variant with two inter-row cultivations applied prior to herbicide application.

Keywords: sunflower, Clearfield technology, inter-row tillage, unstable moisture, yield structure, yield, bioenergetic efficiency

Введение

Подсолнечник является основной масличной культурой в России. По данным открытых источников, за 2015–2024 гг. посевные площади подсолнечника увеличились с 7013 до 9811 тыс. га, или на 28,5 %. В структуре площадей масличных культур доля подсолнечника за данный период снизилась с 60,1 до 51,7 % за счет расширения площадей под льном – с 5,6 до 8,8 %, соей – с 18,5 до 22,9 % и рапсом – с 8,9 до 14,4 %. Несмотря на снижение доли в структуре посевных площадей масличных культур валовый сбор подсолнечника за анализируемый период всегда был максимальным, варьируя от 11,8 до 17,3 млн т. Валовый сбор прочих масличных культур не превышал 6,0–13,3 млн т, минимальные показатели отмечены по посевам горчицы (103–315 тыс. т.) из-за меньшей площади и урожайности культуры. Урожайность подсолнечника среди масличных культур за анализируемый период варьировала от 15,6 до 18,4 ц/га, уступая только урожайности рапса озимого со средней величиной 20,5 ц/га. Урожайность сои в среднем немного уступает подсолнечнику¹.

Е. В. Мищенко с коллегами [1] отмечают, что на долю подсолнечника отводится от 50 до 60 % удовлетворения потребности населения в растительном масле, а по данным С. А. Люфт и О. В. Тимофеева – до 80 % [2]. Однако грубые нарушения технологических приемов возделывания подсолнечника обеспечивают низкую рентабельность и привлекательность культуры [3–5]. Законодательное ограничение посевных площадей подсолнечника в Ростовской области также обуславливает необходимость тщательного подбора агротехники под конкретные почвенно-климатические условия [6].

Обработка почвы является основной технологической операцией в земледелии [1, 7]. К такому выводу, по результатам собственных исследований и анализу научной литературы, приходит целый ряд авторов [8–10]. По мнению А. В. Маковеева [11], Ю. Н. Плескачева [12] и М. М. Оконова [13], при возделывании подсолнечника придание почве определенного физического строения является основой получения высоких урожаев, обуславливая необходимость рыхления верхнего слоя.

В научной литературе много исследований посвящено изучению влияния основной

обработки почвы [14–16] при возделывании подсолнечника, однако работ по применению междурядной обработки на ранних этапах развития подсолнечника до обработки посевов гербицидом крайне мало.

Цель исследования – установить влияние междурядных обработок на продуктивность подсолнечника гибрида Имми при возделывании по технологии Clearfield® в условиях неустойчивого увлажнения Нижнего Дона.

Хотя теоретически рыхление почвы должно улучшать ее аэрацию и доступность питательных веществ, в данной работе авторы сосредоточились на оценке косвенных эффектов механической обработки через измерение структуры урожая, урожайности и энергетической эффективности.

Материалы и методы исследования

Исследования проводились с 2021 по 2023 г. в условиях неустойчивого увлажнения Нижнего Дона на полях УНПК Учхоз «Донское», территориально расположенного в приазовской зоне Ростовской области (Октябрьский район).

Закладка опыта, проведение учетов и наблюдений проводили в соответствии с методиками Б. А. Доспехова [17], В. Ф. Моисейченко [18], Методике государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур [19]. Размещение вариантов в опыте – систематическое (метод организованных повторений). Рандомизация вариантов осуществлялась в пределах каждого повторения методом случайных чисел. Статистическую обработку данных проводили методом дисперсионного анализа (ANOVA) для трехфакторного опыта (факторы: год – 3 градации, вариант междурядной обработки – 3 градации, повторение – 3 градации) с оценкой существенности частных различий по критерию Фишера (F-критерий) и расчетом наименьшей существенной разности (НСР₀₅). Объединение данных за 3 года выполнено по схеме двухфакторного дисперсионного комплекса «год × вариант» с учетом взаимодействия факторов. Площадь учетной делянки 70 м², размеры 7 × 10 м, с повторениями, расположенными последовательно в одном направлении.

Объектом исследования служили растения гибрида подсолнечника Имми. Схема опыта включала варианты междурядных обработок:

1. Без междурядных обработок (контроль).
2. Одна междурядная обработка в фазу 1–2 пары листьев на глубину 6–8 см.

¹ Сельское хозяйство в России. 2025: Стат. сб. / Росстат. М., 2025. 81 с. [Электронный ресурс]. URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/S_x_2025.pdf (дата обращения: 01.07.2026).

3. Две междурядные обработки: первая в фазу 1–2 пары листьев на глубину 6–8 см, вторая – через неделю на глубину 8–10 см.

Особенностью опыта является обоснование необходимости проведения механической обработки почвы при возделывании подсолнечника, выращиваемого по технологии Clearfield до применения гербицида Евро-Лайтнинг в фазу 4–6 настоящих листьев. Сбор масла (т/га) рассчитывали по формуле

$$C = (Y \times M) / 100,$$

где C – сбор масла с единицы площади, т/га; Y – урожайность маслосемян, т/га; M – масличность (содержание масла), %. Масличность определялась на приборе влагомер-масломер цифровой лабораторный ВМЦЛ-12М. Расчет совокупных затрат энергии выполнен на основе нормативов энергозатрат на механизированные операции (ГСМ, амортизация, живой труд) и материальные ресурсы (семена, гербициды), выраженных в ГДж. Коэффициенты пересчета:

1 л дизтоплива = 45,6 МДж;

1 кг семян = 25,0 МДж.

Выход энергии с урожаем определяли умножением урожайности сухого вещества на энергетический эквивалент 1 кг подсолнечника [20].

Результаты исследования и их обсуждение

Метеорологические условия в период исследований были крайне неоднородны. В 2021 г. температура воздуха в первый месяц после посева была выше средних многолетних значений на 1,1 °С, а в летние месяцы средняя температура превысила многолетний средний показатель на 0,8 °С в июне, 2,6 °С в июле и 2,8 °С в августе. В летний период выпало 151,6 мм осадков. За июнь (9 дней с осадками) выпало всего 56,4 мм осадков, из которых за один день выпало 39,8 мм, в июле 8 из 31 дня имели осадки, из которых 3 были дождливыми (10,2–26,8 мм), а в августе за 9 дней выпало 26,8 мм осадков.

Летний период 2022 г. характеризовался сильной засухой с продолжительным отсутствием осадков. Так, в июне выпало 0,3 мм осадков, в июле выпало 25,7 мм за 6 дней, из которых продуктивными были лишь 14,5 мм за сутки, в августе выпало 27,6 мм за 9 дней, из которых продуктивными были лишь 10,7 и 8,1 (за 2 дня). Лето было сухим и жарким при незначительных колебаниях. Минимальная влажность воздуха по месяцам

составила: в июне 27 %, в июле 28 %, в августе 20 %, при максимальной скорости ветра соответственно 18,3; 13,4; 16,1 м/с. В летние месяцы температура была выше средних многолетних значений, а именно: в июне на 3,0 °С, в июле на 0,8 °С, а в августе на 4,5 °С.

В 2023 г. температура воздуха в мае была ниже среднеемноголетних значений, однако в июне превысила их и была более комфортной для роста и развития растений, в сравнении с условиями 2021–2022 гг. Наибольшее превышение к среднеемноголетним значениям отмечено в августе (+3,2 °С).

Первоочередная необходимость проведения механического рыхления почвы при выращивании подсолнечника до гербицидной обработки заключается именно в удалении прямых конкурентов за факторы роста основной культуры. К сроку применения гербицида в зависимости от климатических условий количество сорного компонента может полностью ограничивать доступ к свету и сильно уменьшить темпы роста растений подсолнечника.

В связи с этим в годы исследований проводили учет фактического количества сорного компонента перед применением гербицида по вариантам опыта. В контрольном варианте в годы исследований преобладала доля однодольных сорняков с количеством растений от 52 до 115 шт./м², количество двудольного сорного компонента варьировало от 13 до 47 шт./м² с увеличением показателей в годы повышенного увлажнения. В среднем за годы исследований общая засоренность посевов перед проведением гербицидной обработки составила 107,0 шт./м². Проведение одной междурядной обработки снижало засоренность посевов на 78,9 %, а вторая междурядная обработка обеспечивала гибель 94,6 % сорняков (табл. 1).

После применения гербицида Евро-Лайтнинг (фаза 4–6 настоящих листьев) засоренность посевов во всех вариантах была минимальной и к уборке не превышала 2–5 шт./м² сорных растений, что обусловлено эффективным действием гербицида на фоне механического удаления основной массы сорняков. Дифференциация между вариантами по засоренности к уборке нивелировалась.

Проведение междурядной обработки почвы до гербицидной обработки положительно сказывается на степени засоренности посевов, но, с другой стороны, негативно отражается на сохранности растений к уборке.

Таблица 1

Засоренность посевов перед гербицидной обработкой посевов подсолнечника и гибель сорняков после междурядной обработки, среднее за 2021–2023 гг.

Показатель		Без междурядных обработок (контроль)	1 междурядная обработка	2 междурядных обработки
Количество сорных растений, шт./м ²	однодольных (НСР ₀₅ = 9,4)	81,0	18,7	4,7
	двудольных (НСР ₀₅ = 2,5)	26,0	5,0	1,3
	всего	107,0	23,7	6,0
Гибель сорных растений, %	однодольных	–	77,0	94,2
	двудольных	–	80,8	95,0
	всего	–	78,9	94,6

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

Таблица 2

Показатели корзинки, структура урожая, урожайность и масличность подсолнечника в зависимости от междурядной обработки, среднее за 2021–2023 гг.

Показатель	Контроль – без обработок	Количество междурядных обработок		
		1	2	среднее
Диаметр корзинки, см	20,5	21,4	21,8	21,6
прибавка к контролю, см/%	–	0,9/4,4	1,3/6,3	1,1/5,4
Выполненность корзинки, %	72,8	76,4	78,0	77,2
прибавка к контролю, %	–	3,6	5,2	4,4
Масса 1000 семян, г	58,9	60,1	61,1	60,6
прибавка к контролю, г/%	–	1,2/2,0	2,2/3,7	1,7/2,9
Урожайность, т/га	2,53	2,64	2,69	2,67
прибавка к контролю, т/га / %	–	0,11/4,3	0,16/6,3	0,14/5,3
Масличность, %	49,9	50,2	50,2	50,2
прибавка к контролю, %	–	0,3/0,6	0,3/0,6	0,3/0,6
Сбор масла, т/га	1,26	1,33	1,35	1,34
прибавка к контролю, т/га / %	–	0,07/5,56	0,09/7,14	0,08/6,35

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

По результатам исследований наблюдалась гибель от 0,6 до 1,8 % растений подсолнечника с увеличением кратности механической обработки, однако стимуляция почвенного горизонта и улучшение условий произрастания растений компенсируют данные потери. Междурядные обработки оказали положительное влияние на показатели корзинки подсолнечника, структуру урожайности, урожайность и масличность (табл. 2).

В среднем за годы исследований улучшение условий роста и развития культуры оказало влияние на увеличение диаметра кор-

зинки с 20,5 см в контроле до 21,4–21,8 см, со средним увеличением при междурядных обработках 1,1 см, или 5,4 %, что является существенным при НСР₀₅ = 0,48 см. Выполненность корзинок увеличилась с 72,8 до 77,2 % (НСР₀₅ = 0,96 %). Увеличение выполненности корзинки напрямую повлияло на массу 1000 семян. Минимальное повышение показателя составило 1,2 г, или 2,0 %, в варианте с проведением одной междурядной обработки.

Увеличение кратности механической обработки до двух увеличило массу 1000 семян до 61,1 г, или на 3,7 %. Среднее уве-

личение показателя по междурядным обработкам составило 1,7 г, что является существенным при $HCP_{05} = 1,15$.

В совокупности увеличение показателей структуры урожая от 2,0 до 6,3 % обеспечило существенную прибавку урожайности. Относительно контроля показатель вырос на 0,11 и 0,16 т/га соответственно по вариантам с одной и двумя междурядными обработками ($HCP_{05} = 0,06$). В среднем показатель вырос к контролю на 0,14 т/га или 5,3 %, что безусловно отражает отзывчивость растений подсолнечника именно на улучшение условий питания и отсутствие конкурентов в начальный период роста и развития.

Урожайность подсолнечника в годы исследований варьировала на контроле от 2,18 до 3,14 т/га, проведение одной междурядной обработки повышает урожайность до 2,27–3,28 т/га, вторая междурядная обработка показала самую высокую урожайность – от 2,31 до 3,34 т/га. Проведение анализа урожайных данных показало, что по годам исследований $F > F_{\text{табл}}$, различия значимы ($p < 0,05$).

Проведение общего дисперсионного анализа (все годы) показало, что большую роль играют погодно-климатические условия года и проведение междурядных обработок: эффект года: $F = 4289,13$ – очень высокозначим ($p < 0,001$); эффект обработки: $F = 81,50$ – высокозначим ($p < 0,001$). Все

три года (2021, 2022 и 2023) показывают значимое влияние способа обработки на результаты: эффект обработки является возрастающим: без обработки < 1 обработка < 2 обработки: год оказывает очень значительное влияние (данные 2023 г. заметно выше), и для достижения максимальных показателей урожайности подсолнечника необходимо применять две междурядные обработки.

Показатель лузжистости маслосемян подсолнечника не изменялся под влиянием изучаемого агроприема и составил в среднем 22,32 % (от 22,23 до 22,40 %). Масличность при проведении междурядных обработок превышала величину контроля на 0,3 %, но по результатам математической обработки не была существенной ($HCP_{05} = 1,00$). Несмотря на это, при совместном анализе изменения показателей урожайности и масличности, увеличение одного показателя обеспечило повышение общего сбора масла с 1,26 т/га в контроле на 0,07–0,09 т/га или в среднем на 6,35 % при проведении междурядных обработок посевов подсолнечника.

Оценка биоэнергетической эффективности отражает величину полезной полученной энергии с единицы площади. С проведением междурядных обработок при выращивании подсолнечника по технологии Clearfield® закономерно возрастают совокупные затраты энергии, однако существенное увеличение урожайности полностью нивелирует этот показатель (табл. 3).

Таблица 3

Оценка биоэнергетической эффективности возделывания подсолнечника в зависимости от междурядной обработки, среднее за 2021–2023 гг.

Показатель	Контроль – без обработок	Количество междурядных обработок		
		1	2	среднее
Урожайность, т/га	2,53	2,64	2,69	2,67
прибавка к контролю, т/га / %	–	0,11/4,3	0,16/6,3	0,14/5,3
Выход энергии с урожаем сухого вещества, ГДж/га	54,3	56,7	57,8	57,3
прибавка к контролю, ГДж/га / %	–	2,4/4,4	3,5/6,5	3,0/5,4
Затраты энергии, ГДж/га	6,12	6,18	6,24	6,21
прибавка к контролю, ГДж/га / %	–	0,06/0,98	0,12/1,96	0,09/1,58
Приращение энергии, ГДж/га	48,2	50,5	51,5	51,0
прибавка к контролю, ГДж/га / %	–	2,3/4,77	3,3/6,85	2,8/5,8
Коэффициент энергетической эффективности	8,88	9,17	9,26	9,22
прибавка к контролю, %	–	3,27	4,28	3,77
Энергетическая себестоимость, ГДж/т	2,42	2,34	2,32	2,33
+/- к контролю, ГДж/т / %	–	-0,08/-3,3	-0,10/-4,1	-0,09/-3,7

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

Повышение урожайности в среднем на 0,14 т/га, или 5,3 %, обеспечило повышение выхода энергии с урожаем с 54,3 до 56,7–57,8 ГДж/га, средняя прибавка показателя составляет 5,4 %.

Затраты энергии возросли с 6,12 ГДж/га в контроле до 6,18–6,24 ГДж/га. Увеличение показателя в среднем с проведением междурядной обработки составило 6,21 ГДж/га, что на 0,09 ГДж/га, или 1,58 %, больше, чем в контроле. Несмотря на это, существенное увеличение выхода совокупной энергии с урожаем обеспечило повышение коэффициента энергетической эффективности с 8,88 в контроле до 9,17–9,26 при использовании междурядных обработок. Энергетическая себестоимость урожая отражает затраты на производство одной тонны урожая маслосемян подсолнечника и максимально снижается на 0,1 ГДж/т, или 4,1 %, относительно контроля при проведении двух междурядных обработок посевов в начальные фазы роста и развития культуры (первая в фазу 1–2 пары листьев подсолнечника на глубину 6–8 см, вторая – через неделю на глубину 8–10 см).

Заключение

Междурядные обработки до применения гербицида являются эффективным агроприемом при возделывании подсолнечника по технологии Clearfield® в условиях неустойчивого увлажнения Нижнего Дона. Проведение первой культивации в фазу 1–2 пар листьев на глубину 6–8 см снижало засоренность посевов на 78,9 %, вторая обработка через неделю на глубину 8–10 см обеспечивала гибель 94,6 % сорняков. За счет лучшего режима питания в вариантах с междурядной обработкой отмечено увеличение диаметра корзинки в среднем на 5,4 %, выполненности – на 4,4 %, массы 1000 семян – на 2,9 %. Это обеспечило прибавку урожайности 0,11–0,16 т/га, что подтверждается расчетом $HC_{P05} = 0,06$. Масличность менялась незначительно, но за счет роста урожайности сбор масла увеличился на 5,56–7,14 %.

Незначительное увеличение затрат энергии (0,12 ГДж/га, или 1,96 %, при двух обработках) полностью компенсировалось прибавкой урожая, за счет чего коэффициент энергетической эффективности вырос с 8,88 до 9,17–9,26, а энергетическая себестоимость снизилась на 3,3–4,1 %.

Таким образом, в условиях данного трехлетнего опыта (2021–2023 гг.) на черноземе обыкновенном неустойчивого увлаж-

нения Нижнего Дона при возделывании подсолнечника гибрида Имми по технологии Clearfield® наибольшая урожайность и сбор масла отмечены на варианте с двумя междурядными обработками до применения гербицида.

Список литературы

1. Мищенко Е. В., Семина Н. И., Галаганов П. А., Савон А. Г. Оценка приемов основной обработки почвы при возделывании подсолнечника // Проблемы развития АПК региона. 2024. № 3 (59). С. 64–69. DOI: 10.52671/20790996_2024_3_64. EDN: ISSYKG.
2. Люфт С. А., Тимофеев О. В. Влияние применения междурядной культивации на урожайность подсолнечника // Развитие аграрной науки и ее роль в обеспечении продовольственной безопасности страны: материалы национальной научно-практической конференции (с международным участием), посвященной 115-летию со дня рождения А. С. Фатьянова, 95-летию со дня рождения Ю. П. Сиротина, 55-летию со дня образования факультета агрохимии и почвоведения (в настоящее время биоэкологического факультета) (г. Нижний Новгород, 05–06 декабря 2023 г.). Нижний Новгород: Нижегородский государственный агротехнологический университет, 2023. С. 190–192. EDN: AQXONK.
3. Чурзин В. Н., Дубовченко А. О. Агротехническая оценка способов основной обработки почвы и применения удобрений в технологии возделывания подсолнечника на черноземах Волгоградской области // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2019. № 3 (55). С. 127–134. DOI: 10.32786/2071-9485-2019-03-16. EDN: KSUXCB.
4. Плещачев Ю. Н., Сухова О. В. Засоренность посевов полевых севооборотов в зависимости от обработки почвы Волгоградской области // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2013. № 3 (101). С. 017–021. EDN: PWPWMN.
5. Кильдюшкин В. М., Солдатенко А. Г., Животовская Е. Г., Подколзин О. А. Урожайность подсолнечника и сои на черноземе, выщелоченном в зависимости от технологии возделывания в Краснодарском крае // Масличные культуры. 2018. № 2 (174). С. 71–74. DOI: 10.25230/2412-608X-2018-2-174-71-74. EDN: XTCVNZ.
6. Об утверждении Правил рационального использования земель сельскохозяйственного назначения в Ростовской области: постановление № 905: принят от 20 сентября 2012: послед. ред // Официальный портал Правительства Ростовской области: сайт. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.donland.ru/documents/5510/> (дата обращения: 01.07.2026).
7. Калашников В. А., Бровкина Т. Я., Лучинский А. С., Маковеев А. В. Влияние способа обработки почвы на продуктивность подсолнечника // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2018. № 136. С. 169–178. DOI: 10.21515/1990-4665-136-015. EDN: YPPSPC.
8. Кононов В. М., Шевяхова Е. А., Беликина А. В., Протопопов В. М. Энерго-ресурсосберегающая технология возделывания подсолнечника в условиях светло-каштановых почв Волгоградской области // Известия Горского государственного аграрного университета. 2019. Т. 56. № 4. С. 13–21. EDN: DPXMDV.
9. Маковеев А. В., Лучинский С. И., Кравченко Р. В. Продуктивные и экономические показатели возделывания подсолнечника при разных способах основной обработки почвы // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2020. № 161. С. 271–281. DOI: 10.21515/1990-4665-161-021. EDN: VOPYGL.

10. Солодовников А. П., Полетаев И. С., Летучий А. В. Технологические приемы сохранения влаги и повышения урожайности подсолнечника в экстремальных условиях Заволжья // Аграрный научный журнал. 2025. № 10. С. 80–86. DOI: 10.28983/asj.y2025i10pp80-86. EDN: GBNOAH.
11. Маковеев А. В., Кравченко Р. В., Лучинский С. И., Поливар Е. Г. Влияние различных способов основной обработки почвы на ее агрофизические свойства и продуктивность подсолнечника // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2022. № 94. С. 108–113. DOI: 10.21515/1999-1703-94-108-113. EDN: WKCGYD.
12. Плещачев Ю. Н., Чамурлиев О. Г., Семина Н. И. Влияние способов основной обработки почвы на продуктивность подсолнечника: монография. Волгоград: Волгоградский государственный аграрный университет, 2017. 104 с. EDN: YNCLJZ.
13. Оконов М. М., Плещачев Ю. Н., Эвиев В. А., Джаббаров Н. И., Курепина Н. Л., Фомин С. Д. Оценка влияния способов обработки почвы на урожайность подсолнечника на южно-черноземных почвах западной зоны Республики Калмыкия // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2026. № 1 (85). С. 513–523. DOI: 10.32786/2071-9485-2026-01-54. EDN: NHHDDJ.
14. Насиев Б. Н. Влияние технологии ухода за посевами на урожайность и масличность подсолнечника // Аграрная наука. 2021. № 1. С. 133–135. DOI: 10.32634/0869-8155-2021-344-1-133-135. EDN: BXBKGM.
15. Фетюхин И. В., Авдеев А. П., Авдеев С. С., Рябцева Н. А. Агротехнические приемы формирования элементов продуктивности масличных культур. Персиановский: ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет», 2021. 214 с. EDN: QRATHV. ISBN 978-5-98252-391-4.
16. Фалынсков Е. М., Пойда В. Б., Збраилов М. А., Пискленова Е. К. Продуктивность гибридов подсолнечника иностранной селекции в зависимости от способа борьбы с сорной растительностью в условиях Нижнего Дона // Успехи современного естествознания. 2019. № 5. С. 30–34. EDN: DMEKDH.
17. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований): учебник для студентов высших сельскохозяйственных учебных заведений по агрономическим специальностям. Изд. 6-е, стер., перепеч. с 5-го изд. 1985 г. М.: Альянс, 2011. EDN: QLCQEP. ISBN 978-5-903034-96-3.
18. Моисейченко В. Ф., Трифонова М. Ф., Заверюха А. Х., Ещенко В. Е. Основы научных исследований в агрономии. М.: Колос, 1996. 336 с. EDN: YWPSAQ. ISBN 5-10-003276-6.
19. Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. Выпуск первый. Общая часть. М.: ФГБУ «Госсорткомиссия», 2019. 329 с. [Электронный ресурс]. URL: https://gossortrf.ru/upload/2019/08/metodica_1.pdf (дата обращения: 01.07.2026).
20. Булаткин Г. А. Эколого-энергетические аспекты продуктивности агроценозов. Пушкино: ОНТИ НЦБИ АН СССР, 1986. 210 с. EDN: BMQPRN.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЛИСТЬЕВ БЕРЕЗЫ ПОВИСЛОЙ В МЕСТООБИТАНИЯХ ЛИШАЙНИКОВ СЕВЕРНОЙ КАРЕЛИИ

Катаева М. Н. ORCID ID 0000-0002-7355-4026,

Беляева А. И. ORCID ID 0000-0002-8066-1938

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Ботанический институт им. В. Л. Комарова Российской академии наук,
Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: mkmarikat@gmail.com*

Цель исследования – определить параметры листьев березы повислой в сосняке бруснично-зеленомошном северной Карелии в местообитаниях лишайников, выявить особенности по сравнению с условиями среднетаежного сосняка кустарничково-зеленомошного. Материалы работы получены в сосняках зеленомошной группы на двух пробных площадях. В каждом сосняке с одного модельного дерева березы повислой были собраны листья березы. В этих сосняках собраны образцы эпифитных лишайников на стволах березы. Характеристики листьев березы получены при размере выборок листьев 31 и 60, для сосняков северной и среднетаежной подзон, соответственно. Определены длина, ширина и масса, площади поверхности листьев. В результате работы предложены уравнения регрессии для оценки площади листа березы с использованием произведения его длины и ширины, также массы листа. В этих сосняках получены данные об удельной листовой поверхности листьев березы повислой, 154,2 и 140,5 см²/г, удельной поверхностной плотности листьев березы, 64,8 и 71,2 г/м², соответственно. Результаты исследования можно использовать при конверсии массы листьев березы повислой в площадь листьев. Применение уравнений регрессии справедливо в диапазоне размеров листьев. Биоиндикационная оценка сообществ с использованием лишайников не выявила загрязнения. В лишайнике Карелии на стволе березы Ni и Cu выше, чем в лишайниках, приуроченных к березе в среднетаежной подзоне.

Ключевые слова: Карелия, береза повислая, площадь листьев, тяжелые металлы, *Hypogymnia physodes*

DETERMINATION OF LEAF PARAMETERS OF SILVER BIRCH IN LICHEN HABITATS OF NORTH KARELIA

Kataeva M. N. ORCID ID 0000-0002-7355-4026,

Belyaeva A. I. ORCID ID 0000-0002-8066-1938

*Federal State Budgetary Institution of Science V. L. Komarov Botanical Institute
of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russian Federation,
e-mail: mkmarikat@gmail.com*

The aim of the study is to determine the parameters of the leaves of the silver birch in a bilberry-green moss pine forest in northern Karelia, in lichen habitats, and to identify the differences compared to the conditions of a mid-taiga shrub-green moss pine forest. The materials for the study were obtained in green-moss pine forests at two sample plots. In each pine forest, birch leaves were collected from one model silver birch tree. Samples of epiphytic lichens on the trunks of birch trees were also collected in these pine forests. The characteristics of birch leaves were obtained from leaf sample sizes of 31 and 60, for pine forests in the northern and mid-taiga subzones, respectively. The length, width, and mass, as well as the surface area of the leaves, were determined. As a result of the study, regression equations were proposed for estimating the area of a birch leaf using the product of its length and width, as well as the leaf mass. In these pine forests, data were obtained on the specific leaf surface area of silver birch leaves: 154.2 and 140.5 cm²/g, and on the specific surface density of birch leaves: 64.8 and 71.2 g/m², respectively. The research results can be used to convert the mass of silver birch leaves into leaf area. The application of regression equations is valid within the range of leaf sizes. The bioindication assessment of communities using lichens did not reveal any pollution. In the lichen of Karelia, the concentration of Ni and Cu on the birch trunk is higher than in lichens associated with birch in the middle taiga subzone.

Keywords: Karelia, silver birch, leaf area, heavy metals, *Hypogymnia physodes*

Введение

Лесные сообщества выполняют средообразующую функцию, являются определяющим звеном во влагообороте. Древесный ярус формирует внутреннюю среду сообщества. Поверхность растений можно характеризовать как границу раздела физической и биологической среды биогеоценозов [1, с.16]. При промышленном загрязнении атмосферы важную роль имеет оценка фильтрационной характеристики древес-

ного яруса. С морфометрическими показателями листьев и хвои деревьев связаны трансформация выпадающих поллютантов, катионо-обменные процессы, количество осадков, задерживаемых в кронах [1]. Хвойные леса накапливают больше осадков, чем лиственные, что обуславливает их различное влияние на гидрологический режим территорий. Лиственные и хвойные деревья различаются в отношении влияния на них осадков. Крона березы задерживает до 28%

осадков. Осадки, задержанные в кронах, связаны с величиной фитомассой листьев и хвои сообщества [2]. С возрастом сообществ увеличивается их продуктивность и фитомасса [3]. Поверхность коры деревьев и контактная площадь листьев представляют характеристики среды обитания лишайников, при их атмосферном способе питания.

На показатели листа влияют категории жизненного состояния дерева, загрязнение. При влиянии техногенного загрязнения вблизи промышленных предприятий металлургии у березы повислой было выявлено утолщение листовой пластинки [4]. Уменьшение площади листа березы происходило при адаптации к неблагоприятному водному режиму субстрата и недостатку доступных питательных веществ [5]. Поверхность кроны хвойных и лиственных пород определяет ее барьерные и концентрирующие функции по отношению к загрязняющим веществам, выпадающим в лесах с осадками.

Леса региона Кольского полуострова и смежных территорий испытывают негативное влияние техногенного загрязнения. В северной Карелии, находящейся вблизи промышленно развитых областей, отсутствуют актуальные данные о состоянии воздушной среды и лишайников, влиянии на них экологических факторов. Лиственные породы менее изучены, по сравнению с хвойными.

Цель исследования: определить морфометрические показатели, площадь листьев березы повислой *Betula pendula* Roth. в сосновом сообществе северной Карелии по сравнению со среднетаежным; установить концентрации тяжелых металлов в лишайнике *Hypogymnia physodes* на стволах березы при естественном состоянии сообществ.

Материалы и методы исследования

Листья березы повислой для изучения их параметров собраны в сосняке бруснично-зеленомошном, северная Карелия в середине вегетационного периода. Листья собраны в середине дня в сухую погоду в нижней части кроны, после завершения роста, на укороченных побегах на одном модельном дереве.

Эпифитный лишайник *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl. для анализа собран на стволах березы повислой и сосны, выборка по 4 экз. Высота сбора 1,30–1,50 м. Возраст березы не менее 40–50 лет. Образцы собраны в 2022 г. Сосняк бруснично-зеленомошный и кустарничково-зеленомошный расположены на ненарушенных территориях в подзонах северной тайги Карелии, Лоухский район, и средней тай-

ги, Ленинградская область, Лодейнопольский и Волховский районы [6]. Территории находятся вне зон влияния локальных источников загрязнения атмосферы и без влияния пожаров. На побережье Ладожского озера изучали редколесье сосны мохово-лишайниковое, в напочвенном покрове лишайники. Диаметр ствола модельных деревьев на высоте 1,3 м – 15–17 см.

В лаборатории образцы листьев и лишайников высушены в термостате при 105 °C до абсолютно сухого веса. Пробы лишайника озоляли при 450 °C в муфеле, золу растворяли при нагревании в 2N HCl, использовали бумажный фильтр средней плотности «синяя лента» [6]. Концентрации элементов определяли на ААС Квант-АФА, Россия. Анализ проведен в двух аналитических повторностях, с использованием государственных стандартных образцов (ГСО).

В лаборатории массу высушенных листьев березы определяли на аналитических весах. Длину и ширину листьев измеряли металлической линейкой, вычисляли их произведение, средние показатели. Вычисляли коэффициент K, как отношение фактической измеренной площади листа к квадрату со сторонами, равными длине и ширине, $K = S_{op} / LB$. Площадь листьев определяли методом подсчета на миллиметровой бумаге по контурам листьев. Площадь листьев оценивали для контроля с применением электронного планиметра полярного типа Tamaya Planix 5, Япония. Выборка листьев березы в северной Карелии 31 шт., в среднетаежном сосняке – 60. Данные обработаны в Microsoft Excel 2010 и Statistica 12.0.

Результаты исследования и их обсуждение

В лесных сообществах параметры листа березы экологически связаны с местом произрастания. На них влияют структура древесного полога, сомкнутость кроны, стратификация полога, связанное с ней влияние освещенности, почвенное питание. Площадь листа может изменяться в зависимости от расположения в пологе, в верхней или нижней его части, ценологических, климатических условий, техногенного загрязнения.

По классификации размеров листа Раункиера, листья березы относятся к градации мелких, их площадь не более 20,25 см² [1]. Крона березы относится к типу кроны, собирающей осадки. Суммарная площадь листьев всей кроны березы зависит от возраста и жизненного состояния, она может достигать у взрослых берез более 150–350 м².

Таблица 1

Морфометрические показатели листьев березы повислой
в условиях двух подзон, среднее значение и стандартное отклонение, (M±SD)

Показатели	Северная Карелия	Средняя тайга	Различия, %
Площадь, S_{op} , см ²	10,33±2,66	12,50±2,12	21,00
Длина, L, см	4,28±0,61	5,06±0,38	18,22
Ширина, B, см	3,79±0,55	4,20±0,37	10,81
Масса, m, г, 1 лист	0,067±0,02	0,089±0,02	32,83
Площадь расчетная, см ² , $S_r = L \cdot B$	16,46±4,34	21,36±3,35	29,77
Коэффициент K	0,632±0,06	0,585±0,03	-7,43
Площадь 1 кг листьев, поверхность 1 стороны, м ²	15,42	14,05	-8,90
Площадь 1 кг листьев, двусторонняя, м ²	30,83	28,09	-8,90
Удельная листовая поверхность, SLA, см ² /г	154,2	140,5	-8,90
Удельная поверхностная плотность, LMA, г/м ²	64,86	71,20	9,78

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования. Размер выборки: северная Карелия $n_1=31$, среднетаежная подзона $n_2=60$.

Сосняк бруснично-зеленомошного типа соответствует региональным оптимальным условиям роста сосновых сообществ. В сосняке северной подзоны тайги Карелии и в среднетаежном сосняке получены сходные показатели площади листа и массы. Средняя площадь листьев березы в северной подзоне тайги 10,33 см² (табл. 1).

В северной Карелии двусторонняя площадь 1 кг листьев березы 30,83 м², в среднетаежном сосняке 28,09 м². Удельная листовая поверхность листьев вида, или SLA, specific leaf area, расчетный показатель, его используют при сравнении экологического потенциала местообитаний. Он оценивает изменения структуры и возраста листа, стратегию вида при сменах в сообществах и рассматривается как нормативный признак для лесных пород. Результаты согласуются с данными литературы по удельной листовой поверхности листьев березы повислой, 150–230 см²/г [1]. Масса единицы площади поверхности листа – обратный показатель, который более наглядно связан с толщиной листа [1, 7]. Удельная поверхностная плотность листа (LMA, leaf mass per area) определяется при делении сухой массы листа на площадь. В сосновых сообществах северной Карелии и средней тайги для листьев березы повислой это значение LMA составило 64,86 и 71,20 г/м² (табл. 1).

При построении связи в виде регрессионной модели в качестве независимой переменной (x) приняты произведение ширины и длины, также масса листа, в граммах. Уравнение регрессии при переменной масса листа березы для данных северной

Карелии: $y = 2,68 + 113,5x$, $n = 31$, и оно довольно близкое для среднетаежной подзоны $y = 2,15 + 115,9x$, при $n = 60$ (табл. 2).

Для северной тайги уравнение связи площади и произведения длины и ширины листа $y = 0,961 + 0,569x$, $n = 31$. В среднетаежной подзоне это $y = -0,286 + 0,598x$. Коэффициенты b мало отличаются от нуля. Для получения площади листа березы также можно использовать переходный коэффициент K, определенный по произведению ширины и длины (табл. 1). Площадь листьев березы, подсчитанная на бумаге с помощью планиметра, связана уравнением $y = 0,1346 + 0,978x$. Коэффициент корреляции между ними высокий: $r = 0,983$. Различие определений средней площади всего 0,96%, на миллиметровой бумаге 10,33±2,66 см², с планиметром 10,43±2,68 см². Различия при измерении связаны с мелкопильчатыми краями листьев березы.

Морфометрические характеристики листьев обычно используются для определения оптимальных режимов сообществ, при создании культурных насаждений, при определении гидрологического баланса леса и количества задерживаемых осадков. Однородность условий форофитов в структуре полога, согласно индексам, можно рассмотреть детально. Световой режим влияет на морфолого-анатомические показатели листьев в вертикальной толще полога. При сильном освещении пластинка листа становится толще. По мере ослабления фотосинтетически активной радиации (ФАР) в пологе леса снижается удельная поверхностная плотность листьев, при 5% – 30 г/м² [7].

Таблица 2

Параметры уравнений линейного регрессионного анализа
для определения площади поверхности листьев березы повислой, $y = ax + b$

Независимые переменные	Коэффициенты					
	I	M	Se	t	p	R ²
средняя тайга						
Масса листа	a	115,9	5,36	21,59	<0,001*	0,89
	b	2,15	0,48	4,42	<0,001*	
Произведение длины и ширины	a	0,598	0,02	22,59	<0,001*	0,89
	b	-0,286	0,57	-0,50	0,61	
северная Карелия						
Масса листа	a	113,5	12,93	8,76	<0,001*	0,72
	b	2,68	0,90	2,95	<0,05*	
Произведение длины и ширины	a	0,569	0,042	13,47	<0,001*	0,86
	b	0,961	0,718	1,33	0,19	
Площадь, планиметр Planix 5	a	0,978	0,034	28,72	<0,001*	0,97
	b	0,1346	0,366	0,36	0,71	

Примечание: Степени свободы df: средняя тайга t_1 (58), северная Карелия t_2 (29). I – коэффициент уравнения, a – коэффициент пропорциональности, b – первоначальное значение при $x = 0$, M – значение коэффициентов, Se – ошибка коэффициентов, t – расчетное значение статистики Стьюдента, p – уровень значимости, R² – коэффициент детерминации. Составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

В эколого-физиологических исследованиях показатель удельная поверхностная плотность листьев стал применяться более широко, он перспективен при оценках послепожарной динамики. При сравнении восстановления вересковых кустарничков после пожара было показано, что удельная поверхностная плотность листьев (LMA) на горевших участках болота уменьшалась, при увеличении количество пигментов [8].

Численные значения удельной поверхностной плотности изменяются у более старых листьев. К различиям листьев приводит структура листового аппарата по типам побегов. Листья ростовых побегов березы повислой, или ауксбластов, при одинаковых размерах, как правило, легче листьев укороченных побегов, брахибластов, которые появляются на растениях раньше и в более короткие сроки [1]. Биометрические показатели листьев березы различаются у побегов разного статуса. Береза повислая отличается полиморфизмом, приспособлена к широкому диапазону условий среды, что выражается в тесной связи ее ростовых и морфологических признаков. Выявлены различия размеров листьев березы повислой между типами с разной корой ствола, с меньши-

ми размерами листа для грубокорой формы березы [9].

Березовые леса чаще не представляют коренные сообщества, а являются стадиями возобновления. Береза быстрорастущая светолюбивая порода, ее жизненная стратегия пионерный вид, эксплерент [9]. Береза в основных сообществах на разных стадиях сукцессии встречается как сопутствующий вид. В редкостойных послепожарных сосняках лишайниковых северной тайги количество березы 25–50 экз./га. В среднетаежных молодых производных сообществах больше, свыше 420–700 экз./га [10].

Молодой фитоценоз в меньшей степени влияет на химический состав осадков [11].

Береза с усиленным стоком по гладкой коре стволов, в сочетании с развитой поверхностью кроны, создает особые условия в местообитаниях. На стволах сосны условия более сухие. Концентрации тяжелых металлов в местообитаниях на березе зависят от влияния внешних факторов, состава осадков и примесей, состава листьев, листовой массы кроны.

В лишайнике на стволах березы сосняка северной Карелии концентрация Cd – 0,20 мг/кг. В среднетаежном сосняке в лишайнике на березе определена довольно высокая концентрация Cd, 0,55 мг/кг (табл. 3).

Таблица 3

Химические элементы в *Hypogymnia physodes* на березе и сосне, мг/кг, абс.сух.масса, среднее значение и стандартное отклонение, (M±SD)

Элемент	Карелия, сосняк	Средняя тайга, сосняк	Средняя тайга, побережье	
	ствол березы, n=4	ствол березы, n=4	ствол березы n=4	ствол сосны, n=4
Ni	4,9±1,4 ^a	1,3±0,05 ^b	1,4±0,1 ^b	0,98±0,3 ^b
Cu	5,9±0,2 ^a	3,1±0,1 ^b	3,8±0,5 ^b	3,5±0,3 ^b
Cd	0,20±0,04 ^a	0,55±0,20 ^b	0,55±0,06 ^b	0,47±0,04 ^b
Pb	2,5±0,5 ^a	4,5±0,5 ^b	6,1±0,4 ^b	4,8±4,3 ^{ab}
Fe	467±25 ^a	214±31 ^b	645±60 ^b	402±6,4 ^{ab}
Mn	365±32 ^a	1270±41 ^b	592±35 ^b	156±6 ^b
Zn	71±5 ^a	114±26 ^b	117±8 ^b	58±3 ^c

Примечание: Разными буквами в строках отмечены значения концентраций, которые достоверно различаются, тест Манна-Уитни, $p < 0,05$; n – биологическая повторность. Составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

В среднетаежной подзоне концентрация Cd в талломе лишайников на стволе березы выше, относительно березы в Карелии. Содержание Cd в лишайнике на березе связано с довольно высоким фоновым содержанием элемента в листьях, с вымыванием подвижных форм, особенностями накопления Cd и Zn [3]. По сравнению с сосной, концентрации Zn в лишайнике на стволах березы на побережье Ладожского озера, 117 мг/кг, выше в 2 раза. В лишайнике на березе на побережье в 3,8 раз выше содержание Mn, относительно сосны, и в сосняке оно выше в 8,1 раз. Концентрации Pb в лишайнике на березе в Карелии 2,5 мг/кг, в среднетаежных условиях 4,5–6,1 мг/кг, что не выше фоновых концентраций, 1–8 мг/кг [12]. В талломах лишайника северной тайги Карелии выше содержание Ni в 3,8 раз, Cu, в 1,9 раза, относительно березы в сосняке. Диапазон фоновых концентраций Ni 1–3 мг/кг, Cu 4–10 мг/кг [12]. В лишайнике на березе в средней тайге Cd, 0,55 мг/кг, несколько выше обычного диапазона концентраций в лишайниках, 0,1–0,3 мг/кг. Концентрации тяжелых металлов Ni, Cu, Pb в лишайнике на березе характерны для незагрязненных сообществ. Микроэлементы Fe, Mn, Zn в лишайнике сильнее варьируют на сосне и березе, достоверны различия по Zn.

При рациональном природопользовании необходимо сохранение продукционного потенциала лесных ресурсов и экологического функционирования. Значение лишайников состоит в их определенном влиянии на гидрологические характеристики леса, на сток в лесах, задерживают осадки в кронах до 35% [11]. Биомасса эпифитных ли-

шайников и мхов в старовозрастных хвойных лесах способствует их влагозапасу [13].

Лишайники, напочвенные и эпифитные виды, представляют кормовые ресурсы лесного северного оленя [14]. Особенности экологических условий обитания, накопление промышленных выбросов в среде, приводят к аккумуляции тяжелых металлов в организмах животных, продукции. Это определяет потребность контроля в кормовых видах токсичных тяжелых металлов: Cd, Pb, Hg. Количество зимнего корма оленя в виде воздушно-сухих лишайников до 5 кг в день [15]. Концентрации тяжелых металлов в лишайниках не должны быть выше безопасных показателей. В *Cetraria islandica* обычно характерны более низкие средние концентрации Cd (0,05 мг/кг) и Pb (1,7 мг/кг); Ni и Cu – 0,4–1,2 мг/кг, соответственно, по сравнению с эпифитными лишайниками.

Ряд накопления химических элементов в лишайниках на березе, северная Карелия: Fe>Mn>Zn>Cu>Ni>Pb>Cd; для среднетаежного сосняка на березе Mn>Fe>Zn>Pb>Cu>Ni>Cd, на стволе сосны: Fe>Mn>Zn>Pb>Cu>Ni>Cd. Эти ряды имеют сходный характер, кроме более высокого накопления Fe, относительно Mn, на березе в северной Карелии, и более высокого порядка Pb в средней тайге на сосне и березе.

Листья березы представляют собой активную фракцию опада, пожароопасный лесной горючий материал. Полученные показатели листа березы можно использовать при оценках площади листа по его массе, при определении суммарной площади поверхности крон, опада. Методы с использованием регрессионных уравнений широко используются при изучении роста листьев

растений [16, 17]. Производство длины и ширины листа при расчетах уравнений регрессии признается более информативным, по сравнению с использованием только ширины или длины. Применение регрессионных уравнений справедливо в диапазоне размеров листьев [18].

Заключение

В северотаежных и среднетаежных сообществах определены размерно-массовые характеристики листьев березы повислой для оценки экологического потенциала местообитаний. Предложены уравнения регрессии для определения площади листьев березы по массе листа и по производству длины и ширины листа. Получены относительные показатели листа березы: удельная листовая поверхность и удельная поверхностная плотность. Планиметрический метод и обычный способ на бумаге дают хорошо сопоставимые результаты изменений, с коэффициентом корреляции $r=0,983$.

При естественном состоянии лесных сообществ на березе повислой в эпифитных лишайниках определены концентрации тяжелых металлов, характерные для незагрязненных сообществ. В *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl. на стволах березы в северотаежном сообществе концентрации Ni и Cu выше, чем в среднетаежном.

Список литературы

1. Уткин А. И., Ермолова Л. С., Уткина И. А. Площадь поверхности лесных растений. Сущность, параметры, использование. М.: Наука, 2008. 292 с. ISBN: 978-5-02-034140-1 EDN: QKQUAR.
2. Пристова Т. А. Задержание атмосферных осадков пологом древостоя березово-елового молодняка в условиях средней тайги Республики Коми // Лесной вестник. 2022. Т. 26. № 1. С. 28–34. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-1-28-34. EDN: IZLDIY.
3. Гульбе Я. И., Гульбе А. Я., Гульбе Т. А., Ермолова Л. С. Динамика биологической продуктивности молодняков березы на залежи // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2016. № 46. С. 12–16. EDN: WZXJHX.
4. Беренцева С. В., Борисова Г. Г., Собенин А. В., Малеева М. Г. Изменение структуры листа и пигментного комплекса *Betula pendula* в условиях аэротехногенного загрязнения // Вестник Нижегородского государственного университета. 2024. № 2 (66) С. 4–14. DOI: 10.36906/2311-4444/24-2/01.
5. Чукина Н. В., Филимонова Е. И., Файрузова А. И., Борисова Г. Г. Морфофизиологические особенности листьев *Betula pendula* Roth на золототалах Среднего Урала // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2016. № 6 (159). С. 68–75. EDN: WMOVTV.
6. Катаева М. Н., Беляева А. И. Действие кроны березы на содержание микроэлементов в лишайнике *Bryoria fuscescens* в северо-западном регионе // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2024. № 10. С.5–10. EDN: RHZNPS. DOI: 10.17513/mjrfi.13659.
7. Цельникер Ю. Л., Гульбе Т. А., Гульбе Я. И., Ермолова Л. С., Рождественский С. Г., Уткин А. И. Световой режим и структура фотосинтетического аппарата мелколиственных молодняков // Анализ продукционной структуры древостоев. М.: Наука, 1988. С. 132–142. ISBN: 5-02-004678-7.
8. Гашкова Л. П., Кравец А. В. Оценка изменения параметров листовой пластинки и содержания фотосинтетических пигментов вересковых кустарничков на постпирогенном участке Большого Васюганского болота // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2026. № 73. С.127–142. EDN: AFILNM. DOI: 10.17223/19988591/73/6.
9. Наквасина Е. Н., Некрасова А. В., Прожерина Н. А. Сравнение березы повислой (*Betula pendula* Roth) с разными типами коры по вегетативным и генеративным признакам // Лесной вестник. 2019. Т. 23. № 1. С. 28–36. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-1-28-36.
10. Пристова Т. А. Фитомасса древесных растений в лиственных фитоценозах послерубочного происхождения // Лесной вестник. 2020. Т. 24. № 1. С. 5–13. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-1-5-13.
11. Пристова Т. А. Химический состав атмосферных осадков, подкroновых и поверхностных вод в среднетаежных лиственных насаждениях послерубочного происхождения // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 2. С.63–69. DOI: 10.25750/1995-4301-2022-2-063-069.
12. Баргальи Р. Биогеохимия наземных растений. Экофизиологический подход к биомониторингу и биовосстановлению. М.: ГЕОС, 2005. 457 с. ISBN: 5-89118-364-1.
13. Pypker T. G., Unsworth M. H., Bond B. J. The role of epiphytes in rainfall interception by forests in the Pacific Northwest. I. Laboratory measurements of water storage // Canadian Journal of Forest Research. 2006. Vol. 36. P. 809–818. DOI: 10.1139/X05-298.
14. Мамонтов В. Н. Динамика численности и ареала и особенности экологии европейского лесного северного оленя (*Rangifer tarandus fennicus* Lönbn.) на восточной границе Фенноскандии // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. 2021. № 1. С. 69–81. DOI: 10.17076/bg1306.
15. Белкина А. В., Кирюхина Е. А., Лукьянчикова Л. В., Чаунина Е. А. Анализ особенностей кормления северного оленя // Электронный научно-методический журнал Омского ГАУ. 2020. № 4 (23). EDN: QYYIBD. URL: <http://e-journal.omgau.ru/images/issues/2020/4/00866.pdf> (дата обращения: 15.06.2026).
16. Дорофеева М. М., Бонеецкая С. А. Сравнительный анализ некоторых классических и современных методик определения площади листовой поверхности // Растительные ресурсы. 2020. Т. 56. Вып. 2. С. 182–192. DOI: 10.31857/S0033994620020041.
17. Киселева Н. С. Способ вычисления площади листа группы по линейным измерениям с помощью расчетных коэффициентов и методов вариационной статистики // Сельскохозяйственная биология. 2017. Т. 52. № 1. С. 211–217. DOI: 10.15389/agrobiol.2017.1.211rus.
18. Чернова А. М. К методике определения площади листьев растений *Nymphaeaceae* Salisb. // Труды Института биологии внутренних вод им. И. Д. Папанова РАН. 2021. Вып. 93 (96). С. 138–147. DOI: 10.47021/0320-3557-2021-138-147.

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 по плановой теме БИН РАН НИР 2026 г. «Растительность Европейской России и Северной Азии: разнообразие, динамика, типы местообитаний» № 126020616772-4.

Financing: The work was carried out within the framework of the state assignment for the planned topic of the Botanical Institute of the Russian Academy of Sciences research work 2026 “Vegetation of European Russia and Northern Asia: diversity, dynamics, habitat types” No. 126020616772-4.

СТАТЬЯ

УДК 556.531.4:519.246.8
DOI 10.17513/use.38540



CC BY 4.0

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ КАЧЕСТВА ВОДЫ РЕКИ МОСКВЫ: ОТ АНАЛИЗА СТРУКТУРЫ ДАННЫХ К ПРОГНОЗИРОВАНИЮ

Никитин М. В. ORCID ID 0009-0009-1355-8402,

Розенталь О. М. ORCID ID 0000-0001-6261-6060

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

«Институт водных проблем Российской академии наук»,

Москва, Российская Федерация, e-mail: nikitin.mv2000@gmail.com

Прогнозирование качества воды рек в условиях интенсивной урбанизации является актуальной задачей для обеспечения устойчивого водопользования, однако для р. Москвы подобные исследования на основе анализа временных рядов ранее не проводились. Целью работы является выявление закономерностей пространственно-временной изменчивости гидрохимических показателей р. Москвы и обоснование возможности их статистического прогнозирования. Исследование выполнено на основе данных мониторинга 2018–2023 гг. для 10 створов по 5 показателям: консервативные ионы (Cl^- , SO_4^{2-}), биохимически активные соединения азота (NH_4^+ , NO_3^-) и нефтепродукты. Применен комплексный статистический подход, включающий критерий отношения среднего скользящего размаха к стандартному отклонению для оценки случайности временных рядов, корреляционный анализ Спирмена, метод нормированного размаха для определения персистентности, а также авторегрессионные модели со скользящим средним и метод Холта – Уинтерса для прогнозирования. Установлено, что изменения всех исследованных показателей носят неслучайный характер, что создает теоретическую основу для статистического прогнозирования. Выявлена выраженная пространственная неоднородность наследования гидрохимических характеристик вдоль русла: максимальные коэффициенты корреляции зафиксированы в верхнем течении (0,78–0,91) и на участках стабилизации ниже города (0,83–0,95), тогда как критические нарушения наследования приурочены к зонам интенсивного антропогенного воздействия и смешения вод различного генезиса. Показатели Херста (0,62–0,95) подтверждают персистентность рядов и наличие долговременной памяти. Метод Холта – Уинтерса обеспечил наилучшее качество прогнозов для консервативных ионов. Определены горизонты прогнозирования и участки приоритетного контроля, что позволяет оптимизировать систему мониторинга и обеспечить научное обоснование мер по устойчивому управлению водными ресурсами в урбанизированных условиях. Полученные результаты создают научную основу для оптимизации системы мониторинга и устойчивого управления водными ресурсами р. Москвы в урбанизированных условиях.

Ключевые слова: гидрохимия, прогнозирование, персистентность, Москва-река, качество воды, временные ряды, мониторинг

SPATIOTEMPORAL VARIABILITY OF WATER QUALITY IN THE MOSKVA RIVER: FROM DATA STRUCTURE ANALYSIS TO FORECASTING

Nikitin M. V. ORCID ID 0009-0009-1355-8402,

Rozental O. M. ORCID ID 0000-0001-6261-6060

Federal State Budgetary Institution of Science

“Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences”,

Moscow, Russian Federation, e-mail: nikitin.mv2000@gmail.com

Forecasting river water quality under intensive urbanization is essential for sustainable water management; however, no time series-based forecasting studies have previously been conducted for the Moskva River. The aim of this work is to identify spatiotemporal variability patterns of the Moskva River hydrochemical parameters and to substantiate the feasibility of their statistical forecasting. Monitoring data collected during 2018–2023 at 10 gauging stations for five parameters: conservative ions (Cl^- , SO_4^{2-}), biochemically active nitrogen compounds (NH_4^+ , NO_3^-), and petroleum products were analyzed. A comprehensive statistical approach was applied, including the ratio of average moving range to standard deviation (AMR/SD) to assess time series randomness, Spearman rank correlation analysis, rescaled range (R/S) analysis to determine persistence, and autoregressive moving average models and Holt–Winters models for forecasting. All examined parameters exhibited non-random behavior, providing a theoretical basis for statistical forecasting. A pronounced spatial heterogeneity in the inheritance of hydrochemical characteristics along the river was identified: maximum correlation coefficients were recorded in the upper reaches (0.78–0.91) and in stabilization zones downstream of the city (0.83–0.95), whereas critical disruptions were confined to zones of intense anthropogenic impact and mixing of waters of different origin. Hurst exponents (0.62–0.95) confirmed time series persistence and long-term memory. The Holt–Winters method provided the best forecast quality for conservative ions. Forecasting horizons and priority monitoring reaches were determined, providing a scientific basis for optimizing the monitoring system and sustainable water resource management of the Moskva River under urbanized conditions.

Keywords: water quality, forecasting, persistence, hydrochemistry, monitoring, time series, Moskva River

Введение

Река Москва, являясь главной водной артерией столичного мегаполиса с населением более 13 млн чел., испытывает интенсивную и разнообразную антропогенную нагрузку на всем протяжении своего течения [1, 2]. Трансформация качества речных вод под влиянием урбанизации представляет собой сложный процесс, определяемый взаимодействием естественных гидрологических циклов, биогеохимических процессов самоочищения и множественных источников загрязнения – как точечных (городские очистные сооружения, промышленные предприятия), так и диффузных (поверхностный сток с урбанизированных территорий, атмосферные выпадения) [3–5].

Существующие подходы к мониторингу качества речных вод на урбанизированных территориях преимущественно сводятся к сравнению измеренных концентраций с нормативными значениями¹ [6, 7] и не позволяют своевременно выявлять негативные тенденции и принимать превентивные меры по предотвращению ухудшения качества воды. Между тем разработка методов прогнозирования гидрохимических показателей остается актуальной задачей для водопользования в условиях крупных городских агломераций [8, 9].

Ключевым условием прогнозирования является наличие в структуре временных рядов детерминированных компонент – трендов, сезонных циклов, автокорреляционных зависимостей [10, 11]. Временные ряды качества речных вод формируются под воздействием регулярных факторов (сезонная динамика гидрологического режима, годовые циклы хозяйственной деятельности) и нерегулярных (аварийные сбросы, экстремальные гидрометеорологические события) [12, 13]. Предшествующие исследования показали, что такие ряды часто характеризуются персистентностью – склонностью сохранять направление изменения на определенных временных масштабах [14–16]. Это свойство, количественно оцениваемое показателем Херста, указывает на возможность статистического прогнозирования [14, 17]. Однако его выраженность существенно зависит от характера водосбора и интенсивности антропогенного воздействия [15, 18], что особенно важно для рек урбанизированных территорий [8, 9].

Специфика р. Москвы определяется резкой контрастностью условий формирования

качества воды на различных участках русла, обусловленной градиентом антропогенной нагрузки и сложным характером взаимодействия поверхностных и подземных вод [3, 19, 20]. Русло охватывает территории от относительно естественных ландшафтов верховий до зоны максимальной антропогенной нагрузки в черте мегаполиса [3–5] и участков частичного восстановления в среднем и нижнем течении. Такая пространственная неоднородность позволяет исследовать влияние урбанизации на статистическую структуру временных рядов и, соответственно, на возможность их прогнозирования [7, 8, 21].

Задача прогнозирования осложняется не только антропогенным воздействием, но и влиянием подземных источников питания, формирующих дополнительную неопределенность в динамике показателей. Несмотря на значительное число работ по мониторингу качества воды р. Москвы [1, 4, 20], исследования, направленные на статистическое прогнозирование гидрохимических показателей на основе анализа временных рядов, в доступной литературе не представлены.

Цель исследования – выявление закономерностей пространственно-временной изменчивости гидрохимических показателей р. Москвы на основе комплексного статистического анализа временных рядов и обоснование возможности их прогнозирования для оптимизации системы мониторинга качества воды в урбанизированных условиях.

Материалы и методы исследования

Исследование выполнено на основе данных многолетнего гидрохимического мониторинга р. Москвы за период с 2018 по 2023 г. Выбор шестилетнего периода обусловлен необходимостью обеспечения достаточной длины временных рядов (72 ежемесячных наблюдения) для корректной идентификации сезонных паттернов и долгосрочных трендов, а также однородностью методологии отбора и анализа проб на протяжении данного периода.

Анализ проведен для 5 показателей, охватывающих различные типы веществ: консервативные ионы (Cl^- , SO_4^{2-}), биохимически активные соединения азота (NH_4^+ , NO_3^-) и нефтепродукты (*Urals*), для 10 створов наблюдения, расположенных вдоль русла реки от верхнего течения до устья: Звенигород-2 (M_1), д. Верхний Суян (M_2), Одиноково (M_3), Москва-1 (M_4), Москва-3 (M_5), д. Маяково-1 (M_6), д. Маяково-2 (M_7), Воскресенск-1 (M_8), Воскресенск-2 (M_9), Коломна-1 (M_{10}).

¹ РД 52.24.643-2002. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям. Ростов-на-Дону: Росгидромет, 2002.

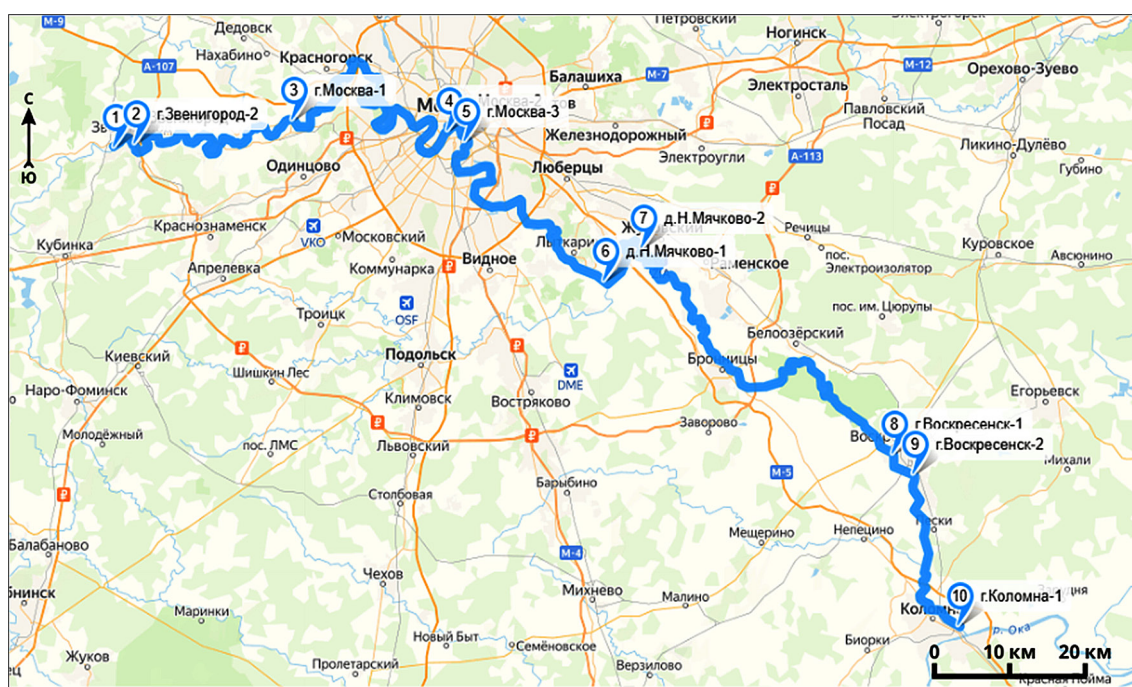


Рис. 1. Схема расположения створов на р. Москве

Примечание: составлен авторами на основе данных мониторинговой сети наблюдений

Выбор створов обусловлен необходимостью охвата градиента антропогенной нагрузки [3, 5]: от минимального воздействия в верхнем течении (M_1 – M_2 , район Звенигорода) через зону максимального техногенного влияния в черте Москвы (M_4 – M_5) к участкам разбавления и частичного самоочищения (M_6 – M_7) и нижнему течению с умеренной нагрузкой от локальных промышленных центров (M_8 – M_{10}). Более подробная схема расположения створов представлена на рис. 1.

Анализ проведен для пяти показателей, охватывающих различные типы веществ: консервативные ионы (Cl^- , SO_4^{2-}), биохимически активные соединения азота (NH_4^+ , NO_3^-) и нефтепродукты ($Urals$).

Для выявления закономерностей изменчивости качества воды применен комплекс статистических методов: критерий отношения среднего скользящего размаха к стандартному отклонению (AMR/SD) для оценки случайности временных рядов; ранговая корреляция Спирмена для количественной оценки наследования гидрохимических характеристик между створами; R/S-анализ для определения персистентности и глубины памяти; модели ARIMA/SARIMA и метод экспоненциального сглаживания Холта – Уинтерса для прогнозирования.

Результаты исследования и их обсуждение

Метод (AMR/SD)

Применение критерия отношения среднего скользящего размаха к стандартному отклонению (AMR/SD) показало, что все исследованные гидрохимические показатели на створах р. Москвы демонстрируют статистически значимое отклонение от референтного значения 1,128, характерного для случайного процесса [22, 23]. Для случайного нормально распределенного процесса AMR/SD стремится к 1,128 [22, 23]; систематическое отклонение вниз свидетельствует о наличии автокорреляции и детерминированных компонент. Следует отметить, что референтное значение выведено в предположении нормальности, тогда как гидрохимические ряды характеризуются выраженной правосторонней асимметрией (до 4,27) и эксцессом (до 25,36), что может влиять на точность порогового значения. Тем не менее направление отклонения (AMR/SD заметно ниже 1,128 на всех створах) однозначно указывает на неслучайный характер рядов. Средние значения AMR/SD для всех пяти показателей укладываются в узкий диапазон 0,70–0,77 (отклонение от случайности 32–38 %). Близость средних значений указывает на общность механизмов формирования

неслучайной структуры данных, хотя консервативные ионы обнаруживают несколько большую степень детерминированности.

Результаты применения критерия отношения среднего скользящего размаха к стандартному отклонению (AMR/SD) для р. Москвы представлены на рис. 2.

Пространственное распределение значений AMR/SD вдоль русла различается для разных групп веществ. Значения для хлоридных ионов последовательно снижаются от верхнего течения (0,83–0,87 на створах M_1 – M_4) к нижнему (0,63–0,71 на створах M_7 – M_{10}): степень детерминированности временных рядов возрастает вниз по течению. Минимум 0,63 на створе M_{10} говорит о максимальной выраженности регулярных компонент в устьевой части реки, где процессы смешения завершены и гидрохимический режим стабилизирован.

Сульфатные ионы характеризуются наиболее стабильными значениями AMR/SD (0,54–0,83) с минимальной пространственной вариабельностью. Среднее значение

0,70 – наименьшее среди всех показателей – закономерно для консервативных сульфатов, практически не участвующих в биохимических трансформациях и слабо подверженных сорбционным процессам [19, 24]. Минимальное значение 0,54 на створе M_4 в центральной части Москвы может объясняться регулярностью поступления сульфатов от промышленных источников и систем водоотведения.

Для аммонийного азота картина обратная: наименьшие значения AMR/SD отмечены в верхнем течении (0,62–0,63 на створах M_2 и M_4), наибольшие – в среднем и нижнем (0,87–0,93 на створах M_6 , M_8 , M_{10}). По мере движения водной массы по руслу стохастические факторы усиливают свое влияние, поскольку интенсивность нитрификации зависит от множества нерегулярных условий: температуры, содержания растворенного кислорода, активности микробиоценоза [5, 24]. Максимум 0,93 на створе M_8 соответствует наибольшей непредсказуемости динамики аммонийного азота в районе Воскресенска.

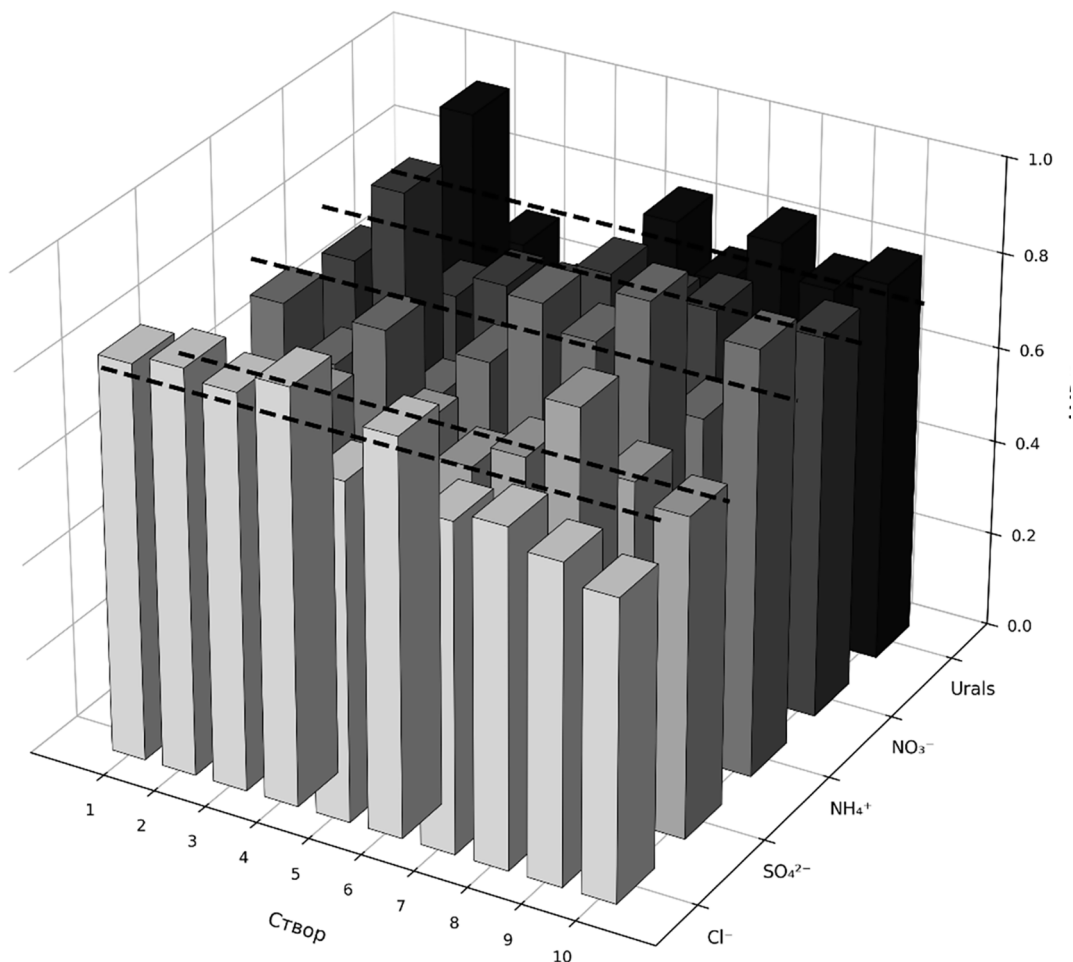


Рис. 2. Значения критерия AMR/SD для гидрохимических показателей на створах р. Москвы
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Таблица 1

Коэффициенты ранговой корреляции Спирмена
концентраций загрязняющих веществ на р. Москве

Вещество	M ₁ –M ₂	M ₂ –M ₃	M ₃ –M ₄	M ₄ –M ₅	M ₅ –M ₆	M ₆ –M ₇	M ₇ –M ₈	M ₈ –M ₉	M ₉ –M ₁₀
Cl ⁻	0,853	-0,035	0,271	0,650	0,049	0,910	0,706	0,926	0,831
SO ₄ ²⁻	0,777	0,034	0,193	0,576	0,025	0,867	0,540	0,926	0,646
NH ₄ ⁺	0,799	-0,255	0,297	0,112	0,200	0,860	0,527	0,946	0,775
NO ₃ ⁻	0,913	-0,144	0,508	0,490	-0,052	0,836	0,485	0,833	0,872
Urals	0,820	0,009	0,208	0,381	0,178	0,894	0,293	0,721	0,566

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

Нефтепродукты показывают промежуточные значения AMR/SD (0,60–0,94) с максимумом на створе M2 (0,94), приближающимся к границе случайного процесса. Вероятная причина – эпизодический характер поступления нефтепродуктов от локальных источников в районе верхнего течения. В центральной части (M₄–M₅) значения падают до 0,60–0,61 – загрязнение от множества урбанистических источников носит более регулярный характер.

Таким образом, совокупность полученных данных подтверждает наличие детерминированной структуры временных рядов всех исследованных показателей – выраженные тренды, автокорреляция и периодические компоненты формируют теоретическую основу для прогнозирования качества воды.

Корреляционный анализ

Для количественной оценки связи между створами применен непараметрический метод статистического изучения связи – ранговая корреляция Спирмена. Результаты представлены в табл. 1.

Результаты корреляционного анализа выявили выраженную пространственную неоднородность наследования гидрохимических характеристик вдоль русла р. Москвы [12]. Средние значения коэффициентов корреляции Спирмена варьируют от 0,452 для нефтепродуктов до 0,574 для хлоридных ионов – степень наследования для большинства показателей умеренная. Однако усредненные значения маскируют принципиально важную закономерность: чередование участков с высоким и низким наследованием, определяемое характером антропогенного воздействия.

На участке верхнего течения M₁–M₂ (район Звенигорода) все коэффициенты корреляции максимальны (0,777–0,913; табл. 1), что отражает сохранение временной струк-

туры данных при минимальном антропогенном воздействии.

Критическое нарушение наследования происходит на участке M₂–M₃ (Звенигород – Одинцово), где коэффициенты корреляции приближаются к нулю или становятся отрицательными: от -0,255 для аммонийного азота до 0,034 для сульфатных ионов. Такой перелом свидетельствует о существенной трансформации гидрохимических характеристик при подходе к урбанизированной зоне Московской агломерации [3]. Отрицательный коэффициент для аммонийного азота (-0,255) особенно показателен и может объясняться сменой доминирующего источника: от естественного фона в верхнем течении к антропогенному поступлению с противофазным сезонным режимом в пригородной зоне.

В черте Москвы (участки M₃–M₄ и M₄–M₅) корреляционные связи частично восстанавливаются, но на более низком уровне (0,11–0,65). Наибольшую степень наследования сохраняют хлоридные ионы (0,65 между M₄–M₅) благодаря их консервативным свойствам. Корреляция для аммонийного азота минимальна (0,112 между M₄–M₅) – сказывается интенсивность биохимических трансформаций в условиях городского загрязнения.

На участке M₅–M₆ при выходе из Москвы вновь отмечается практически полная потеря корреляционных связей (коэффициенты от -0,052 до 0,200). Эта зона представляет собой переходный участок, где смешиваются воды различного генезиса: речной сток, сбросы очистных сооружений, притоки малых рек [1, 3]. Стохастичность процессов смешения приводит к разрушению временной структуры данных.

Между створами M₆–M₇ (район д. Маяково) корреляция резко восстанавливается до максимальных значений (0,836–0,910;

табл. 1): гидрохимические процессы стабилизируются после прохождения зоны интенсивного антропогенного воздействия.

В нижнем течении (M_7 – M_{10}) сохраняются устойчиво высокие коэффициенты (0,485–0,946; табл. 1), с максимумом на участке M_8 – M_9 и некоторым снижением к M_9 – M_{10} (0,566–0,872), вероятно, из-за локальных источников загрязнения в районе Коломны.

Иерархия показателей по степени наследования отражает их физико-химические свойства: консервативные ионы характеризуются наибольшим средним коэффициентом корреляции (0,574 для хлоридных, 0,509 для сульфатных ионов), нитратный азот занимает промежуточное положение (0,527), аммонийный азот – 0,473, а нефтепродукты демонстрируют наименьшее значение (0,452) вследствие биохимических трансформаций и неравномерности поступления.

*Описательная статистика
и распределение приоритетных
загрязнителей*

Для трех приоритетных загрязнителей (NH_4^+ , NO_3^- и нефтепродукты) на пяти репрезентативных створах (M_1 , M_3 , M_5 , M_7 , M_{10}) рассчитаны основные показатели. Результаты представлены в табл. 2.

Из 10 створов, охваченных мониторингом, для детального анализа описательной статистики в табл. 2 выбраны 5 репрезентативных створов (M_1 , M_3 , M_5 , M_7 , M_{10}),

отражающих ключевые зоны формирования качества воды. Анализ описательной статистики приоритетных загрязнителей на репрезентативных створах выявил закономерное увеличение средних концентраций по мере приближения к урбанизированной территории с последующей частичной стабилизацией или снижением в нижнем течении. Средняя концентрация аммонийного азота возрастает от 0,21 мг/л на створе M_1 до 3,21 мг/л на створе M_7 – 15-кратный рост под влиянием городского загрязнения. На створе M_{10} наблюдается снижение до 2,17 мг/л, отражающее процессы самоочищения в нижнем течении.

Содержание нитратного азота меняется сходным образом – от 1,05 мг/л в верховьях до 4,63 мг/л на створе M_{10} в устьевой части реки. Нефтепродукты характеризуются пиком концентрации на створе M_5 в центре Москвы (0,20 мг/л) с последующим снижением до 0,08–0,10 мг/л в нижнем течении вследствие процессов биodeградации.

Коэффициент вариации (CV) отражает относительную изменчивость показателей и варьирует от 0,51 до 1,09. Наибольшая вариабельность характерна для нефтепродуктов на створе M_5 (CV = 1,09) вследствие эпизодического характера техногенных поступлений. Относительно стабильными являются концентрации нитратного азота на всех створах (CV = 0,51–0,78), что связано с ролью биогеохимического цикла азота.

Таблица 2

Статистические характеристики временных рядов
приоритетных загрязнителей на репрезентативных створах р. Москвы

Критерий	Створы														
	M_1			M_3			M_5			M_7			M_{10}		
Вещество	NH_4^+	NO_3^-	Urals	NH_4^+	NO_3^-	Urals	NH_4^+	NO_3^-	Urals	NH_4^+	NO_3^-	Urals	NH_4^+	NO_3^-	Urals
μ (среднее)	0,21	1,05	0,03	0,23	1,04	0,04	2,71	3,40	0,20	3,21	4,07	0,10	2,17	4,63	0,08
σ (ст. откл.)	0,17	0,82	0,02	0,16	0,74	0,02	1,62	1,96	0,22	1,83	2,33	0,06	1,70	2,35	0,05
CV	0,85	0,78	0,56	0,72	0,71	0,63	0,60	0,58	1,09	0,57	0,57	0,58	0,78	0,51	0,59
S (асимметрия)	2,02	2,92	2,01	1,28	1,52	2,34	0,60	1,38	4,27	0,89	2,24	2,44	0,70	0,49	2,55
K (эксцесс)	4,68	14,28	5,90	2,28	3,92	7,59	0,50	5,76	25,36	0,81	11,47	7,74	-0,49	2,63	8,87
Min	0,02	0,05	0,01	0,01	0,03	0,01	0,10	0,05	0,03	0,55	0,11	0,04	0,03	0,05	0,03
Max	0,88	5,86	0,10	1,01	4,37	0,16	8,82	14,86	2,01	8,88	17,08	0,35	6,60	13,56	0,33
ACF ₁	0,21	0,32	0,24	0,28	0,29	0,35	0,49	0,35	0,03	0,54	0,32	0,19	0,60	0,59	0,17
H (Херст)	0,78	0,92	0,72	0,75	0,92	0,73	0,82	0,90	0,65	0,83	0,83	0,72	0,88	0,95	0,62
β (спектр)	0,43	0,51	0,02	0,47	0,28	0,37	0,45	0,35	0,01	0,86	0,47	0,26	1,03	1,15	0,46
Тип шума	Б	Р	Б	Б	Б	Б	Б	Б	Б	Р	Б	Б	Р	Р	Б

Примечание: составлена авторами на основе данных, полученных в ходе исследования. Б – белый шум, Р – розовый шум.

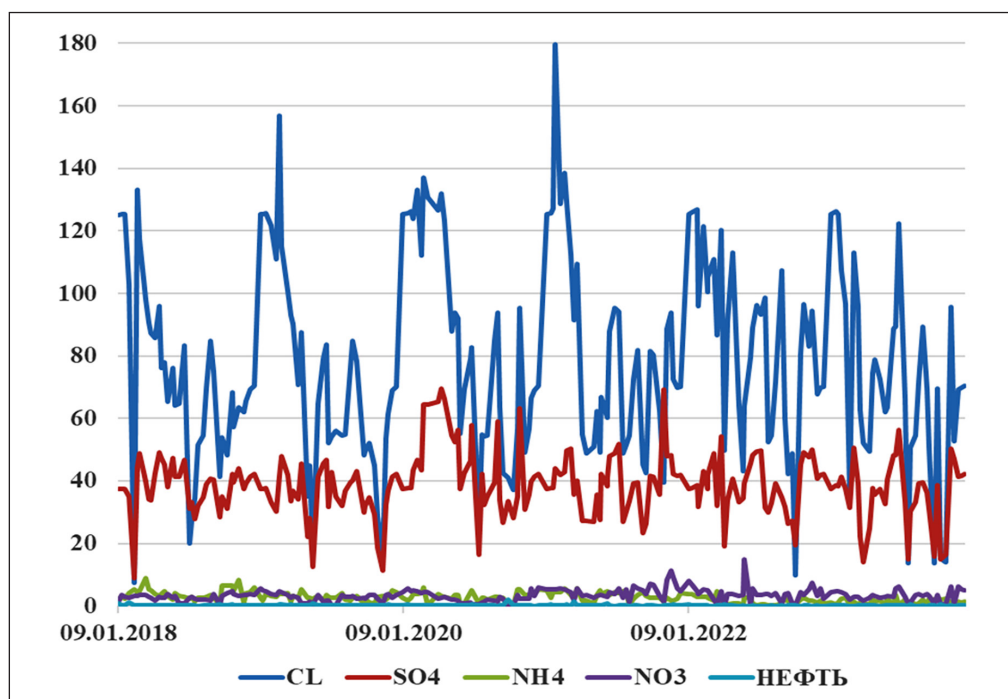


Рис. 3. Движение исходного ряда загрязнителей на створе M_5
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Все распределения характеризуются положительной асимметрией ($S = 0,49-4,27$) и повышенным эксцессом, что типично для концентраций загрязняющих веществ [11, 13]. Максимальный эксцесс ($K = 25,36$) отмечен для нефтепродуктов на створе M_5 (рис. 3), повышенные значения характерны и для нитратного азота ($K = 14,28$ на M_1 ; $K = 11,47$ на M_7). Отклонение от нормальности не ограничивает применимость моделей ARIMA/SARIMA: оценки параметров методом максимального правдоподобия остаются состоятельными при ненормальных остатках [10], однако доверительные интервалы прогнозов расширяются.

Автокорреляционная функция первого порядка (ACF1) характеризует краткосрочную память временных рядов. Значения варьируют от минимальных 0,03 для нефтепродуктов на створе M_5 до максимальных 0,60 для аммонийного азота на створе M_{10} . Закономерно, что наибольшая краткосрочная автокорреляция приходится на показатели с выраженной сезонной динамикой в условиях стабилизированного гидрохимического режима нижнего течения.

Показатель Херста (H), характеризующий долгосрочную персистентность временных рядов, находится в диапазоне 0,62–0,95. Все значения превышают 0,5, то есть процессы носят трендовый характер [15–17]. Вместе с тем при длине ряда $N = 72$ оценки

H могут быть смещены в сторону завышения [15, 18] и носят индикативный характер. Максимальные значения H отмечены для аммонийного азота на створах M_5 , M_7 и M_{10} – именно здесь долговременная память выражена сильнее всего. Нефтепродукты характеризуются минимальными значениями H (0,62–0,73 на нижних створах), приближающимися к границе случайного блуждания.

Спектральный показатель β позволяет классифицировать ряды: $\beta < 0,5$ – белый шум, $0,5 < \beta < 1,5$ – розовый шум [17, 18]. Розовый шум характерен преимущественно для нижнего течения: аммонийный азот переходит от белого шума в верхнем и среднем течении (M_1 , M_3 , M_5) к розовому на створах M_7 и M_{10} ($\beta = 0,86$ и $1,03$ соответственно), нитратный азот переходит к розовому шуму только на створах M_1 ($\beta = 0,51$) и M_{10} ($\beta = 1,15$), тогда как на промежуточных створах M_3 , M_5 и M_7 остается в зоне белого шума. Нефтепродукты на всех исследованных створах относятся к белому шуму ($\beta = 0,01-0,46$): стохастические процессы преобладают в их динамике независимо от положения на русле. Вместе с тем для ряда показателей наблюдается расхождение между H и β : например, для нитратного азота на створе M_1 при $H = 0,92$ ожидаемое $\beta = 2H - 1 = 0,84$, тогда как фактическое $\beta = 0,51$. Причины – статистическая неопределенность оценок при коротких

рядах ($N = 72$), завышение H методом R/S [15, 18] и наличие нелинейных зависимостей, не улавливаемых спектральным анализом [17]. Глубина памяти (τ), определенная по затуханию ACF до незначимого уровня, варьирует от 4 до 12 временных единиц (месяцев) [10, 15]. Максимальная память $\tau = 12$ отмечена для аммонийного азота на створе M_7 , минимальная $\tau = 4$ – для ряда показателей в верхнем течении и для нефтепродуктов. Иначе говоря, прогноз аммонийного азота в нижнем течении потенциально может опираться на информацию за последний год наблюдений, тогда как для нефтепродуктов горизонт памяти ограничен четырьмя месяцами.

Прогнозирование ARIMA/SARIMA

Для каждого показателя на всех створах идентифицированы оптимальные модели по критерию минимума AIC [10]. Модели ARIMA низкого порядка – преимущественно (1, 1, 1) и (2, 1, 1) – оказались оптимальными для большинства комбинаций «створ – показатель». Основная динамика временных рядов, таким образом, определяется авторегрессионной компонентой первого-второго порядка с дифференцированием для достижения стационарности.

Сезонные модели SARIMA показали неоднозначные результаты. Анализ 50 комбинаций «створ – показатель» показал, что учет сезонности оправдан лишь в 30 % случаев – преимущественно для нитратного азота в нижнем течении (M_9-M_{10}), где улучшение прогноза достигает +64,6 % по RMSE. В большинстве случаев сезонные модели ухудшают прогноз: при малом числе полных циклов (6 лет) сезонные параметры подстраиваются под случайные особенности обучающей выборки, и RMSE возрастает в 2,5–20 раз, особенно для консервативных ионов на верхних створах, где сезонный сигнал маскируется устойчивым фоновым уровнем. Годовая сезонность ($S = 12$) характерна для консервативных ионов, для биогенных элементов – более короткая ($S = 2-6$) [13].

Пространственная дифференциация качества моделей подчиняется общей закономерности: наилучшие результаты достигаются в нижнем течении (M_8-M_{10}), где RMSE для аммонийного азота составляет 0,9–1,0 мг/л, для нитратного азота – 1,3–3,6 мг/л, для нефтепродуктов – менее 0,1 мг/л. В центральной части (M_4-M_5) ошибки прогноза возрастают, особенно для нефтепродуктов (RMSE до 0,2 мг/л на створе M_5), поскольку поступление загрязнений от множественных городских источников

носит выраженный стохастический характер. Наилучшая относительная прогнозируемость получена для аммонийного азота: RMSE составляет 0,1–1,4 мг/л при средних концентрациях 0,2–3,2 мг/л (относительная ошибка 30–50 %).

Метод Холта – Уинтерса

Метод Холта – Уинтерса применялся в варианте с аддитивной сезонностью и аддитивным трендом. Параметры сглаживания (α , β^* , γ) оптимизировались по критерию минимума суммы квадратов остатков с использованием библиотеки statsmodels (Python). Метод обеспечил улучшение качества прогнозирования по сравнению с ARIMA/SARIMA для большинства показателей за счет адаптивного взвешивания последних наблюдений.

В верхнем течении (створы M_1-M_2), где корреляционный анализ выявил максимальные коэффициенты наследования (0,78–0,91), метод обеспечивает высокое качество прогноза: для хлоридных ионов RMSE составляет 4,6–12,5 мг/л, для сульфатных – 3,2–8,0 мг/л, для нефтепродуктов – 0,01–0,02 мг/л. Это существенно ниже, чем для моделей ARIMA, особенно для консервативных ионов.

В черте Москвы (створы M_3-M_5) качество прогноза остается стабильным, что согласуется с частичным восстановлением корреляционных связей на данном участке. Для хлоридных ионов RMSE составляет 5,9–12,5 мг/л, для аммонийного азота – 0,09–0,89 мг/л, для нитратного – 0,41–1,05 мг/л. Нефтепродукты на створе M_5 характеризуются повышенной ошибкой (RMSE = 0,11 мг/л) вследствие высокой вариабельности исходного ряда.

В нижнем течении (створы M_6-M_{10}) качество прогноза меняется нелинейно. Для хлоридных ионов RMSE увеличивается от 17,5 мг/л на M_6 до 19,0 мг/л на M_9 , затем резко снижается до 0,05 мг/л на M_{10} . Такая нелинейная зависимость связана с завершением процессов смешения и стабилизацией гидрохимического режима в устьевой зоне, где коэффициенты корреляции M_9-M_{10} достигают 0,57–0,87.

Аномально низкое значение RMSE для хлоридных ионов на створе M_{10} (0,05 мг/л, относительная ошибка менее 0,5 %) может объясняться квазистационарными условиями устьевой части под влиянием р. Оки. Данные были разделены на обучающую (2018–2022 гг., 60 наблюдений) и тестовую (2023 г., 12 наблюдений) выборки, столь высокая точность требует верификации на более длительном горизонте.

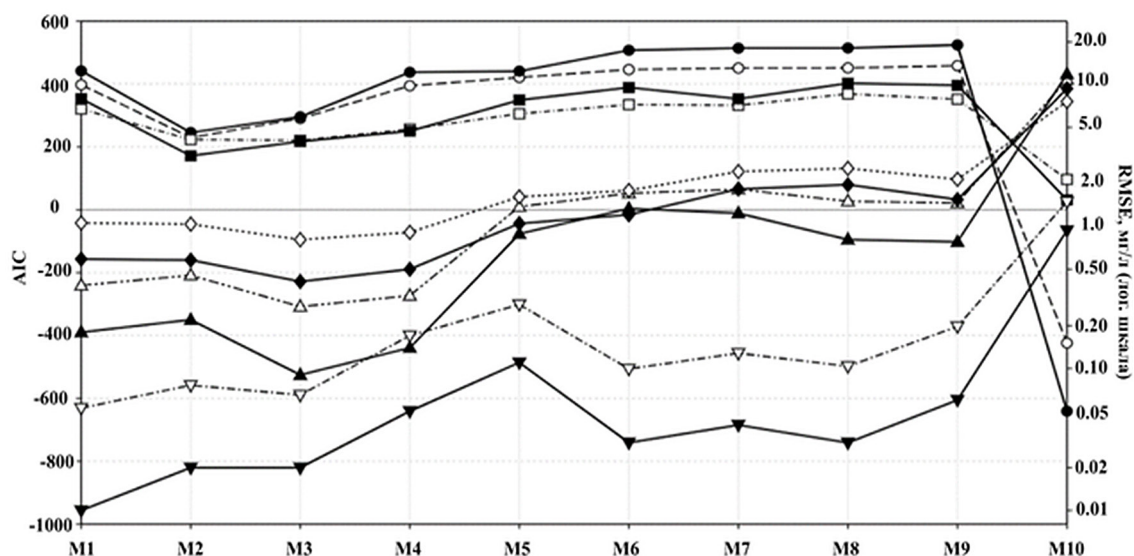


Рис. 4. Значения AIC и RMSE моделей метода Холта – Уинтерса для прогнозирования гидрохимических показателей р. Москвы. Горизонтальная серая линия соответствует нулевому значению AIC. Левая ось (пунктирные линии) – AIC (линейная шкала); правая ось (сплошные линии) – RMSE, мг/л (логарифмическая шкала). Круги – Cl^- , квадраты – SO_4^{2-} , направленные вверх треугольники – NH_4^+ , ромбы – NO_3^- , направленные вниз треугольники – *Urals*
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Для биогенных элементов метод Холта – Уинтерса обеспечивает устойчивые результаты на всем протяжении реки. Для аммонийного азота RMSE составляет 0,09–1,34 мг/л, для нитратного – 0,41–1,97 мг/л. Эти значения соответствуют относительной ошибке 20–50 % в зависимости от створа, что приемлемо для целей оперативного прогнозирования.

Абсолютные ошибки для нефтепродуктов минимальны (RMSE = 0,01–0,11 мг/л). Однако при фоновых концентрациях 0,03–0,20 мг/л относительная погрешность может достигать 50–100 %. Наибольшая точность прогноза достигается в верхнем течении (M_1 – M_3), где RMSE не превышает 0,02 мг/л. Подробные результаты представлены на рис. 4.

Прогнозируемость временных рядов определяется совокупностью факторов: степенью наследования между створами, глубиной памяти, типом шума и стабильностью сезонных паттернов.

Заключение

Ограничения исследования. Длина временных рядов (72 ежемесячных наблюдения за 6 лет) накладывает ограничения на надежность ряда примененных методов. Оценки показателя Херста методом R/S при столь коротких рядах могут быть смещены в сторону завышения, а сезонные модели SARIMA с периодом $S=12$ распо-

лагают лишь шестью полными циклами для идентификации параметров. Описательная статистика приоритетных загрязнителей представлена для 5 из 10 створов; экстраполяция выводов на промежуточные створы требует осторожности. Прогностические модели валидировались на данных одного года (2023 г.), что не позволяет полностью исключить влияние специфических условий этого периода на оценку качества прогнозов. Для перекрестной верификации оценок персистентности целесообразно привлечение альтернативных методов (DFA, вейвлет-анализ) при накоплении более длительных рядов наблюдений. Проведенное исследование позволило установить ключевые закономерности пространственно-временной изменчивости качества воды р. Москвы и обосновать возможность статистического прогнозирования гидрохимических показателей как инструмента устойчивого водопользования.

Критерий AMR/SD подтвердил неслучайный характер изменений всех исследованных показателей (AMR/SD = 0,70–0,77) и тем самым обосновал возможность статистического прогнозирования. Показатели Херста в диапазоне 0,62–0,95 указывают на персистентность временных рядов, а глубина памяти $\tau = 4$ –12 месяцев определяет практический горизонт, в пределах которого

историческая информация сохраняет прогностическую ценность.

Корреляционный анализ выявил выраженную пространственную дифференциацию наследования гидрохимических характеристик вдоль русла. Максимальные коэффициенты корреляции зафиксированы в верхнем течении (0,78–0,91 на участке M_1 – M_2) и в зоне стабилизации ниже города (0,83–0,95 на участках M_6 – M_7 и M_8 – M_9). Критические нарушения наследования приурочены к переходным зонам M_2 – M_3 и M_5 – M_6 , где коэффициенты корреляции приближаются к нулю или принимают отрицательные значения. В этих зонах происходит интенсивное смешение вод различного генезиса, включая подземные источники питания, и именно это обуславливает стохастичность гидрохимических процессов и невозможность прогнозирования на основе данных вышележащих створов.

Сравнительный анализ прогностических моделей показал, что метод Холта – Уинтерса обеспечивает наилучшее качество прогнозов для консервативных ионов и биогенных элементов (RMSE 0,05–19,0 мг/л для хлоридов, 0,09–1,34 мг/л для аммонийного азота), тогда как модели ARIMA предпочтительны для нефтепродуктов вследствие эпизодического характера их поступления.

На основании полученных результатов сформулированы рекомендации по горизонтам прогнозирования. Краткосрочный прогноз (1–3 месяца) с относительной ошибкой 15–40 % может быть обеспечен для всех створов р. Москвы. Среднесрочный прогноз (3–6 месяцев) возможен для консервативных ионов на участках с высоким наследованием (M_1 – M_2 , M_6 – M_7 , M_8 – M_9), где коэффициенты корреляции превышают 0,70. Увеличение горизонта прогнозирования свыше 6 месяцев сопряжено с возрастанием неопределенности и требует регулярной переоценки параметров моделей по мере поступления новых данных мониторинга.

Оптимальная стратегия мониторинга включает базовые створы с высоким наследованием (M_1 , M_7 , M_9) для построения прогнозов и контрольные створы (M_3 , M_6) для верификации моделей. Для зон приоритетного контроля (M_2 – M_3 , M_5 – M_6) рекомендуется учащение отбора проб до одного раза в декаду в период весеннего половодья.

Список литературы

1. Соколов Д. И., Ерина О. Н., Терешина М. А., Чалов С. Р. Антропогенное воздействие на содержание органических веществ в Москве-реке // Четвертые Виноградовские чтения. Гидрология: от познания к мировоззрению: сб. докл. меж-

дунар. науч. конф. памяти Ю. Б. Виноградова. СПб.: ООО «Издательство ВВМ», 2020. С. 771–776. [Электронный ресурс]. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43310018> (дата обращения: 04.06.2026).

2. Sokolov D. I., Erina O. N., Tereshina M. A., Chalov S. R. Human impact on organic matter distribution in the Moskva River // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 163. Art. 05013. DOI: 10.1051/e3sconf/202016305013.

3. Shinkareva G., Erina O., Tereshina M., Sokolov D., Ly-chagin M., Kasimov N. Anthropogenic factors affecting the Moskva River water quality: levels and sources of nutrients and potentially toxic elements in Moscow metropolitan area // Environmental Geochemistry and Health. 2023. Vol. 45. Is. 6. P. 3113–3141. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10653-022-01393-8> (дата обращения: 04.06.2026). DOI: 10.1007/s10653-022-01393-8.

4. Тимофеева Е. А., Караванова Е. И. Оценка экологического состояния Москвы-реки в районе Курьяновских очистных сооружений // Городские исследования и практика. 2018. Т. 3. № 3. С. 99–110. URL: <https://usp.hse.ru/article/view/10546> (дата обращения: 04.06.2026). DOI: 10.17323/usp33201899-110.

5. Booth D. B., Roy A. H., Smith B., Capps K. A. Global perspectives on the urban stream syndrome // Freshwater Science. 2016. Vol. 35. Is. 1. P. 412–420. URL: https://www.journals.uchicago.edu/doi/10.1086/684940?_cf_chl_rt_tk=1Q5xUUIJG08ghOe6fQMokWlctn8KYcHjPwH-v_3eo-1786108521-1.0.1.1-HqY3xAeH5ENAhK_jUvmHbx-OFen_v7pHwzLPVeiBdDfk (дата обращения: 04.06.2026). DOI: 10.1086/684940.

6. Moiseenko T., Dinu M., Bazova M., de Wit H. A. Long-Term Changes in the Water Chemistry of Arctic Lakes as a Response to Reduction of Air Pollution: Case Study in the Kola, Russia // Water, Air, & Soil Pollution. 2015. Vol. 226. Is. 4. Art. 98. DOI: 10.1007/s11270-015-2310-0.

7. Лямперт Н. А., Ничипорова И. П., Первышева О. А., Хорошевская В. О., Голубкина М. А., Лобченко Е. Е. Изменение качества поверхностных вод на территории Центрального федерального округа в 2016–2021 гг. // Успехи современного естествознания. 2024. № 2. С. 22–29. URL: <https://scinetnetwork.ru/articles/36726> (дата обращения: 04.06.2026). DOI: 10.17513/use.38214.

8. Фашевская Т. Б., Словягина А. Н., Полянин В. О., Алгушаева А. В. Антропогенные изменения гидрохимического режима и качества воды городского водотока: на примере реки Лихоборки, Московский регион // Водные ресурсы. 2023. Т. 50. № 2. С. 203–217. URL: https://journals.rcsi.science/0321-0596/article/view/134852/en_US (дата обращения: 04.06.2026). DOI: 10.31857/S0321059623020074.

9. Katimon A., Shahid S., Mohsenipour M. Modeling water quality and hydrological variables using ARIMA: A case study of Johor River, Malaysia // Sustainable Water Resources Management. 2018. Vol. 4. Is. 4. P. 991–998. DOI: 10.1007/s40899-017-0202-8.

10. Box G. E. P., Jenkins G. M., Reinsel G. C., Ljung G. M. Time Series Analysis: Forecasting and Control. 5th ed. Hoboken: Wiley, 2015. 712 p. ISBN 978-1-118-67502-1.

11. Shumway R. H., Stoffer D. S. Time Series Analysis and Its Applications: With R Examples. 4th ed. Cham: Springer, 2017. XIII, 562 p. DOI: 10.1007/978-3-319-52452-8. ISBN 978-3-319-52451-1.

12. Dupas R., Abbott B. W., Minaudo C., Fovet O. Distribution of Landscape Units Within Catchments Influences Nutrient Export Dynamics // Frontiers in Environmental Science. 2019. Vol. 7. Art. 43. P. 1–8. DOI: 10.3389/fenvs.2019.00043.

13. Rode M., Wade A. J., Cohen M. J., Hensley R. T., Bowes M. J., Kirchner J. W., Arhonditsis G. B., Jordan P., Kronvang B., Halliday S. J., Skeffington R. A., Rozemeijer J. C., Aubert A. H., Rinke K., Jomaa S. Sensors in the Stream: The High-Frequency Wave of the Present // Environmental Science & Technology. 2016. Vol. 50. Is. 19. P. 10297–10307. DOI: 10.1021/acs.est.6b02155.

14. Hurst H. E. Long-term storage capacity of reservoirs // Transactions of the American Society of Civil Engineers. 1951. Vol. 116. P. 770–799. URL: <https://colab.ws/articles/10.1061%2FTACEAT.0006518> (дата обращения: 12.06.2026). DOI: 10.1061/TACEAT.0006518.
15. Koirala S. R., Gentry R. W., Perfect E., Mulholland P. J., Schwartz J. S. Hurst Analysis of Hydrologic and Water Quality Time Series // Journal of Hydrologic Engineering. 2011. Vol. 16. Is. 9. P. 717–724. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000357.
16. Markonis Y., Koutsoyiannis D. Scale-dependence of persistence in precipitation records // Nature Climate Change. 2016. Vol. 6. Is. 4. P. 399–401. URL: https://www.nature.com/articles/nclimate2894?error=cookies_not_supported&code=2b1f070-5ddb-4fa2-8326-78408f5f252e (дата обращения: 12.06.2026). DOI: 10.1038/nclimate2894.
17. Mandelbrot B. B., Wallis J. R. Robustness of the rescaled range R/S in the measurement of noncyclic long run statistical dependence // Water Resources Research. 1969. Vol. 5. Is. 5. P. 967–988. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Robustness-of-the-rescaled-range-R-S-in-the-of-long-Mandelbrot-Wallis/409277c521d2ae5cc11c89f63f116023b5edfebd> (дата обращения: 12.06.2026). DOI: 10.1029/WR005i005p00967.
18. O'Connell P. E., Koutsoyiannis D., Lins H. F., Markonis Y., Montanari A., Cohn T. The Scientific Legacy of Harold Edwin Hurst (1880–1978) // Hydrological Sciences Journal. 2016. Vol. 61. Is. 9. P. 1571–1590. DOI: 10.1080/02626667.2015.1125998.
19. Lintern A., Webb J. A., Ryu D., Liu S., Bende-Michl U., Waters D., Leahy P., Wilson P., Western A. W. Key factors influencing differences in stream water quality across space // Wiley Interdisciplinary Reviews: Water. 2018. Vol. 5. Is. 1. e1260. URL: https://www.researchgate.net/publication/320591512_Key_factors_influencing_differences_in_stream_water_quality_across_space (дата обращения: 25.07.2026). DOI: 10.1002/wat2.1260.
20. Tereshina M., Erina O., Sokolov D., Efimova L., Kasimov N. Nutrient dynamics along the Moskva River under heavy pollution and limited self-purification capacity // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 163. Art. 05014. URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2020/23/e3sconf_vc2020_05014/e3sconf_vc2020_05014.html (дата обращения: 25.07.2026). DOI: 10.1051/e3sconf/202016305014.
21. Черногаева Г. М., Жадановская Е. А., Журавлева Л. Р., Малеванов Ю. А. Загрязнение окружающей среды в регионах России в начале XXI века: коллективная монография / отв. ред. А. А. Тишков. М.: ООО «ПОЛИГРАФ-ПЛИОС». 2019. 232 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42478647> (дата обращения: 25.07.2026). ISBN 978-5-906644-48-0.
22. Montgomery D. C. Introduction to Statistical Quality Control. 8th ed. Hoboken: Wiley, 2019. 768 p. ISBN 978-1-119-39930-8.
23. Montgomery D. C., Runger G. C. Applied Statistics and Probability for Engineers. 7th ed. Hoboken: Wiley. 2018. 720 p. [Электронный ресурс]. URL: https://books.google.ru/books/about/Applied_Statistics_and_Probability_for_E.html?id=XATlwAEACAAJ&redir_esc=y (дата обращения: 25.07.2026). ISBN 978-1-119-40036-3.
24. Корецкая А. С. Изменение климата в России. Методы оценки изменения климата // Вестник науки. 2024. Т. 2. № 6. С. 2135–2140. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=67354934> (дата обращения: 25.07.2026).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование: Работа выполнена в рамках темы № FMWZ-2025-0002 Государственного задания ИВП РАН.

Financing: This work was carried out within the framework of topic No. FMWZ-2025-0002 of the State Assignment of the IWP RAS.

СТАТЬЯ

УДК 553.04:553.32

DOI 10.17513/use.38541



CC BY 4.0

ПРОГНОЗНЫЕ РЕСУРСЫ ХОЙТО-АГИНСКОГО МАРГАНЦЕВОГО УЗЛА АКША-ИЛИНСКОЙ СЕРИИ (ВОСТОЧНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ)

¹Соловьев А. Н. ORCID ID 0009-0008-3716-2851,²Соловьева Л. М. ORCID ID 0009-0000-9522-0310,^{1,3}Чекушина Т. В. ORCID ID 0000-0001-9261-1105

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы»,
Москва, Российская Федерация, e-mail: alexandersolowiev@yandex.ru;

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Геологический институт Российской академии наук», Москва, Российская Федерация;

³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова
Российской академии наук», Москва, Российская Федерация

Марганцевые руды Восточного Забайкалья представляют интерес как потенциальный источник марганцевого сырья для восточной части России, где промышленно значимые запасы марганца практически отсутствуют. Хойто-Агинский марганцевый узел, расположенный в пределах Агинской площади и приуроченный к породам акша-илинской серии (агинская и зуткулейская свиты), остаётся изученным неравномерно: детальные поисково-разведочные работы проведены лишь на месторождениях Кусочи и Монголтуйское, тогда как пункты минерализации марганца на остальной территории узла изучены слабо. Целью работы стала переоценка прогнозных ресурсов узла с учётом фациальных предпосылок и геохимических данных, свидетельствующих о вероятном оруденении на глубине. В качестве материалов использованы результаты буровых и геохимических работ на месторождениях Кусочи и Монголтуйское, а также ранее полученные оценки прогнозных ресурсов. Представленное в статье исследование носит теоретический характер; новые полевые данные отсутствуют. По данным изученной площади определена площадная удельная продуктивность, которая применена к прогнозной площади узла с использованием коэффициента подобия 0,4. Коэффициент подобия принят с определённой долей условности на основании метода геологической аналогии и экспертной оценки. В результате расчётов получена оценка прогнозных ресурсов категории РЗ – прогнозной категории российской классификации с наименьшей степенью достоверности, в целом сопоставимой с предполагаемыми ресурсами. Для слабо изученной площади оценка составила 14,84 млн т. С учётом ранее учтённых ресурсов рудного поля общая оценка ресурсов Хойто-Агинского узла составила 37,3 млн т, что превышает совокупную оценку предыдущих исследований – 29,76 млн т. Новая оценка позволяет рассматривать Хойто-Агинский узел как более перспективный марганцеворудный объект, чем считалось ранее. Предложенный подход к пересчёту прогнозных ресурсов может быть использован при дальнейшем геологическом изучении территории.

Ключевые слова: Восточное Забайкалье, марганцевые месторождения, акша-илинская серия, подсчеты ресурсов, прогнозные ресурсы

PROJECTED RESOURCES OF THE KHOITO-AGINSKY MANGANESE NODE OF THE AKSHA-ILINSKY SERIES (EASTERN TRANSBAIKALIA)

¹Solovev A. N. ORCID ID 0009-0008-3716-2851,²Soloveva L. M. ORCID ID 0009-0000-9522-0310,^{1,3}Chekushina T. V. ORCID ID 0000-0001-9261-1105

¹Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education
“Patrice Lumumba Russian University of Friendship of Peoples”,
Moscow, Russian Federation, e-mail: alexandersolowiev@yandex.ru;

²Federal State Budgetary Institution of Science
“Geological Institute of the Russian Academy of Sciences”, Moscow, Russian Federation;

³Federal State Budgetary Institution of Science “Institute of Problems
of Integrated Development of Subsoil named after Academician N. V. Melnikov
of the Russian Academy of Sciences”, Moscow, Russian Federation

Manganese ores of Eastern Transbaikalia are of interest as a potential source of manganese raw materials for eastern Russia, where industrially significant manganese reserves are virtually absent. The Khoito-Aginsky manganese ore cluster, located within the Aginskaya area and hosted by rocks of the Aksha-Ilinsky Series (the Aginskaya and Zutkuleyskaya formations), has been studied unevenly. Detailed exploration has been conducted

only at the Kusochi and Mongoltuiskoye deposits, whereas manganese mineralization occurrences throughout the remainder of the cluster remain poorly studied. The aim of this study was to reassess the prognostic resources of the cluster, taking into account facies-related criteria and geochemical data indicating probable mineralization at depth. The study used the results of drilling and geochemical surveys conducted at the Kusochi and Mongoltuiskoye deposits, as well as previously published prognostic resource estimates. The research presented in this article is theoretical in nature; no new field data were collected. Specific areal productivity was determined from data for the explored area and applied to the prognostic area of the cluster using a similarity coefficient of 0.4. The similarity coefficient was adopted with a certain degree of uncertainty based on the geological analogy method and expert assessment. The calculations yielded a category P3 prognostic resource estimate. Under the Russian classification, P3 is the prognostic category with the lowest degree of confidence and is broadly comparable to inferred resources. The estimate for the poorly explored area amounted to 14.84 Mt. When combined with the previously estimated resources of the ore field, the total resource estimate for the Khoito-Aginsky cluster reached 37.3 Mt, exceeding the cumulative estimate of previous studies of 29.76 Mt. The revised estimate indicates that the Khoito-Aginsky cluster may have greater manganese potential than previously assumed. The proposed approach to reassessing prognostic resources may be used in further geological investigations of the area.

Keywords: Eastern Transbaikalia, manganese deposits, Aksha-Ilinsky series, resource estimates, forecast resources

Введение

Марганцевые ресурсы обладают существенной промышленной значимостью. Однако для большинства месторождений качество руды низкое: по содержанию марганца они в большинстве своём относятся к бедным разновидностям [1]. Дополнительным осложняющим фактором выступает трудная обогатимость этих руд, сопровождающаяся повышенными концентрациями фосфора, железа и кремнезёма.

При значительных транспортно-логистических расходах возможно обеспечение ресурсами восточной части страны. Однако стоит учитывать большой объём транспортно-логистических затрат, ввиду которых транспортировка может быть нецелесообразна. На востоке располагаются местные марганцеворудные объекты (рис. 1), среди которых выделяются Громовское месторождение и Хойто-Агинский марганцевый узел (Восточное Забайкалье) [2].

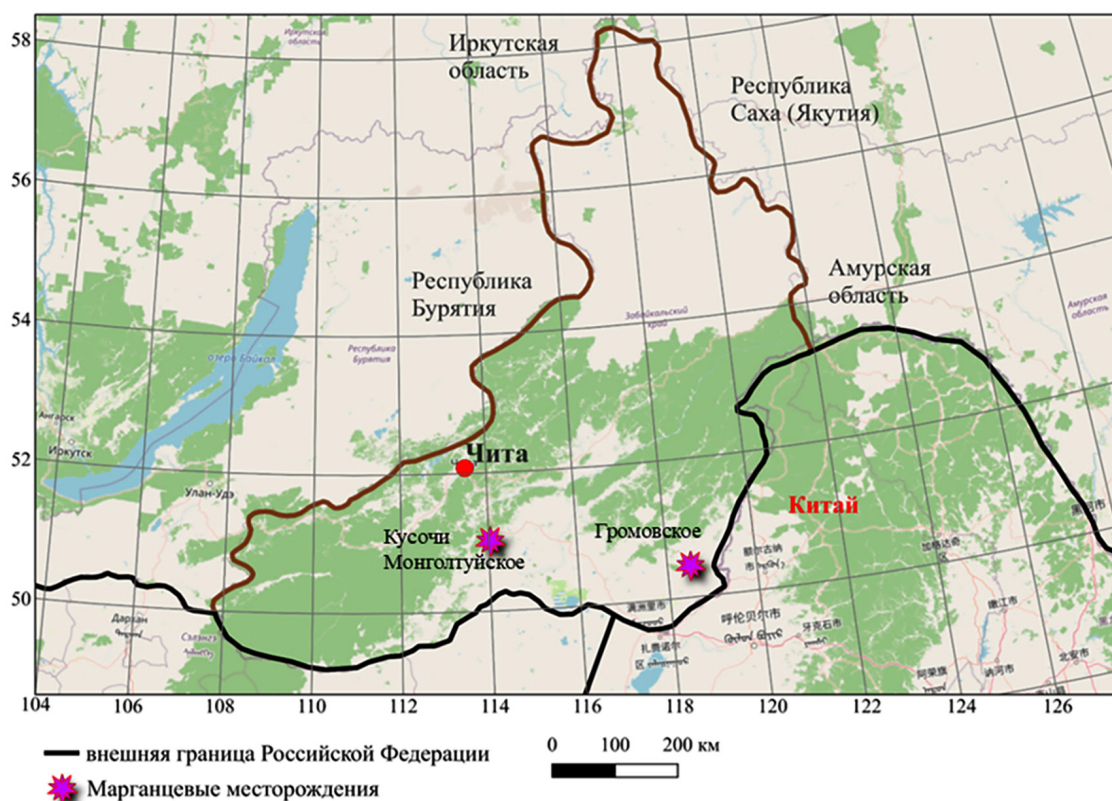


Рис. 1. Марганцевые месторождения Восточного Забайкалья

Примечание: карта составлена авторами на основе источника [2] с изменениями: обозначены месторождения, добавлена картографическая основа

Сравнивая руды Громовского месторождения и Хойто-Агинского узла, выясняется, что последние беднее. Авторы настоящей статьи связывают этот факт с недостаточной изученностью и методикой подсчета запасов.

Прогнозные ресурсы по категории P_3 Хойто-Агинского узла, за исключением территории поля, подсчитаны на основании обнаруженных пунктов минерализации марганца. В настоящей статье представим альтернативную интерпретацию прогнозных ресурсов, поскольку, по мнению авторов, Хойто-Агинский узел должен располагать большими объемами руды [3]. Имеется в виду объем окисленной руды, а не содержащемся MnO_2 .

В данной работе опишем, как происходила оценка прогнозных ресурсов и подсчет запасов по категории C_2 (перспективные, неразведанные запасы) предшествующими исследованиями. Предложим свой метод подсчета запасов и прогнозных ресурсов. **Цель исследования** – переоценка прогнозных ресурсов Хойто-Агинского марганцевого узла. Актуальность исследования обусловлена сырьевыми нуждами в марганцевом компоненте.

Материал и методы исследования

В пределах Хойто-Агинского узла находятся малое месторождение Кусочи, среднее месторождение Монголтуйское, проявления: Участок № 1, Урдо-Агинское, Наринское, Удэ-Гунтэйское. Известны пункты минерализации, которые изучены слабо [2].

Хойто-Агинский узел согласно картографической номенклатуре принадлежит к территории Агинской площади. На Агинской площади неоднократно проводились геохимические, геофизические исследования и работы по геологическому доизучению. Стратиграфически оруденение принадлежит к породам акша-илинской серии: агинской и зуткулейской свитам [4, 5]. И агинская, и зуткулейская свиты имеют флишоподобное строение [6].

На рис. 2 отмечена площадь поисково-разведочных работ. Площадь проведенных работ сравнительно меньше площади Хойто-Агинского поля и одноименного узла.

Стоит отметить, что по результатам геохимических работ большая часть Агинской площади лежит в поле марганцевой аномалии (рис. 2, II). Авторы допускают, что зоны омарганцевания сформировались под влиянием значительных тектонических процессов, приведших к концентрированию

аномальных содержаний марганца в определенных зонах [7]. Это приводит авторов к мысли о том, что марганцевые ресурсы остаются подсчитанными не в полном объеме [8, 9].

Марганцевое оруденение месторождений Монголтуйского и Кусочи представлено корой выветривания, залегающей на глубине около 30 м, приблизительно до 43 м. Оруденение сосредоточено в породах акша-илинской серии верхней перми – нижнего триаса. Это время характеризуется осадконакоплением в условиях бассейна с неспокойным гидродинамическим режимом. Позднее, к концу триаса, произошло закрытие бассейна. Для Агинской площади описывается, что коллизионные процессы происходили в средне-позднеюрское время [10]. Из этого следует, что марганцевая минерализация может иметь осадочное или осадочно-гидротермальное происхождение.

Ввиду предполагаемых условий формирования оруденения авторы считают, что очерчивать его для прогнозирования ресурсов необходимо по породам акша-илинской серии [11, 12].

Расчет прогнозных ресурсов

В первую очередь обратимся к характеристике пунктов минерализации. На территории Хойто-Агинского узла развито 6 пунктов минерализации (таблица).

Пункты минерализации марганца тяготеют к южной части Хойто-Агинского узла, выходя за рамки одноименного поля. Большое распространение пункты минерализации получили вблизи бассейна реки Урда-Ага. Зоны омарганцевания, милонитизации, дробления, к которым принадлежат пункты минерализации Хойто-Агинского узла, косвенно могут принадлежать к второстепенным разломам.

По повышенным содержаниям марганца в пунктах минерализации авторы предполагают оруденение на глубине, идентичное уже разведанному. На наличие оруденения указывают прежде всего фациальные предпосылки [13, 14]. Отложения характеризуются богатыми органическими остатками. Роль органического вещества высока при образовании марганцевых отложений.

Наиболее хорошо изучены месторождения Кусочи и Монголтуйское. На площади поисково-разведочных работ проводилось бурение, на основании которого были определены размеры рудных тел. Для рудных тел были подсчитаны запасы по категории C_2 и прогнозные ресурсы окисленных руд.

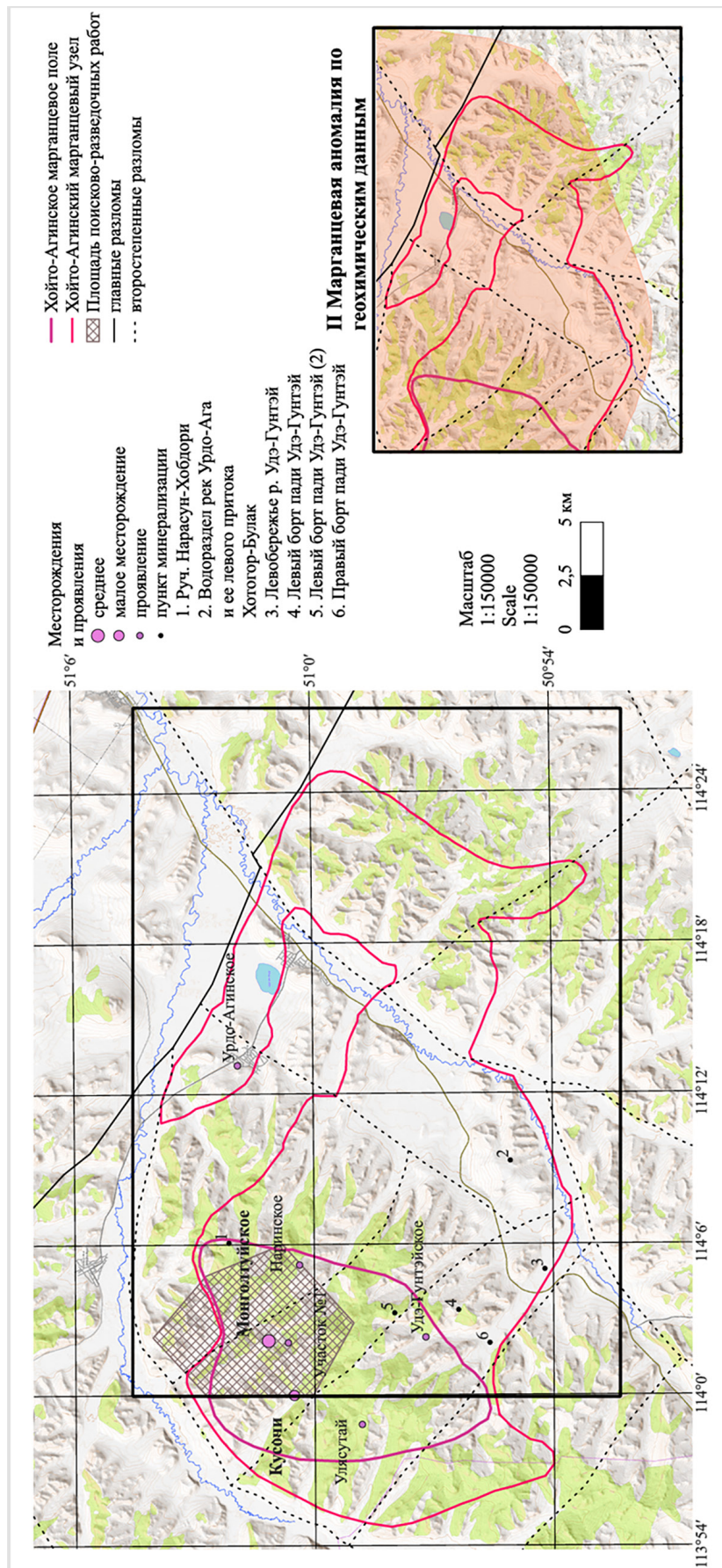


Рис. 2. Хойто-Агинский марганцевый узел. II Марганцевая аномалия
 Примечание: карта составлена авторами на основе источника [2],
 добавлены второстепенные разломы, наложена площадь распространения геохимической аномалии

Пункты минерализации Хойто-Агинского узла

Номер на карте	Название проявления, пункта минерализации, ореола и потока	Метасоматические изменения	Породы, претерпевшие изменения	Содержание Mn
1	Руч. Нарасун-Хобдори	зоны омарганцевания	кремнистые аргиллиты	до 16 %
2	Водораздел рек Урдо-Ага и ее левого притока Хотогор-Булак	зоны дробления и милонитизации	не описано	от 0,5 до 5,0 %, в единичных пробах – 8,3 %
3	Левобережье р. Удэ-Гунтэй	зоны омарганцевания	дроблённые алевролиты	Спектральным анализом в штучных пробах выявлено до 5 %
4	Левый борт пади Удэ-Гунтэй	зона милонитизации	не описано	более 3 %
5	Левый борт пади Удэ-Гунтэй	ожелезнение	брекчированные песчаники	Спектральным анализом штучных проб установлены – 5 %
6	Правый борт пади Удэ-Гунтэй	омарганцевание	дроблённые песчаники	5–7 %

Примечание: составлена авторами на основе источника [2].

Месторождения марганца представлены стратиформным типом оруденения вместе с телами, имеющими сложную форму. По рудным пересечениям, полученным на основе буровых работ, были подсчитаны запасы для месторождений Кусочи и Монголтуйское по категории C_2 , которые составили 7,96 млн т. Запасы рудного поля считаются также по сведениям буровых работ. Известны сведения о прогнозных ресурсах окисленных руд для поля (22,46 млн т), рассчитанных по категориям $C_2+P_1+P_2+P_3$. Данные сведения учитывают ресурсы месторождений (Монголтуйское и Кусочи), проявлений: Участок № 1, Урдо-Агинское, Наринское и Удэ-Гунтэйское.

На остальной площади Хойто-Агинского узла и одноименного поля не проводились комплексы детальных исследований. По одноименному узлу описаны прогнозные ресурсы по категории P_3 в количестве 7,3 млн т. Авторы выражают некоторые сомнения относительно данной оценки ресурсов узла.

Значительно опоискованная площадь рудного поля принята авторами за аналог оруденения, что необходимо для экстраполяции данных на площадь узла. Экстраполяция в данном исследовании основывается на применении метода геологической аналогии с элементами экспертной оценки. Одинаковая глубина у известного и у прогнозируемого оруденения обусловлена работой в пределах одного рудного узла. По той же причине метод геологической аналогии не применим «в чистом виде».

Опираясь на ресурсы рудного поля и участков, где проводились буровые работы,

проведена переоценка прогнозных ресурсов для площади Хойто-Агинского узла (рис. 3).

Расчет прогнозных ресурсов основывается на сведениях поисково-разведочных работ: площадь работ ($S_p=65 \text{ км}^2$) и её запасы ($Q_p=7,96 \text{ млн т}$). Запасы в 7,96 млн т подсчитаны для Хойто-Агинского поля. По представленным данным рассчитывается площадная удельная продуктивность g по формуле 1 [15].

$$G = Q_p / S_p = 0,12 \text{ млн т / км}^2, \quad (1)$$

Площадь авторского прогноза равна площади узла ($S_u=409,27 \text{ км}^2$) с вычетом площади рудного поля ($S_p=100,09 \text{ км}^2$) составит:

$$S_x = S_u - S_p = 309,18 \text{ км}^2, \quad (2)$$

Предполагается, что площадь узла будет схожа по своим запасам наиболее опоискованной площади – площади проведения поисково-разведочных работ [16, 17]. Тогда воспользуемся коэффициентом подобия (K).

Коэффициент подобия в данном исследовании целесообразно рассчитывать, опираясь на распространение минерализации по площади, ведь фактически сведения опоискованной площади экстраполируются на площадь прогноза. В обычной практике применяется система критериев, содержащая оценку по формационному, геоморфологическому, геодинамическому, структурному, магматическому, литолого-фациальному, стратиграфическому и др. параметрам. Авторы статьи считают нецелесообразным оценку по системе критериев, так как работа ведется с одной и той же минерализацией.

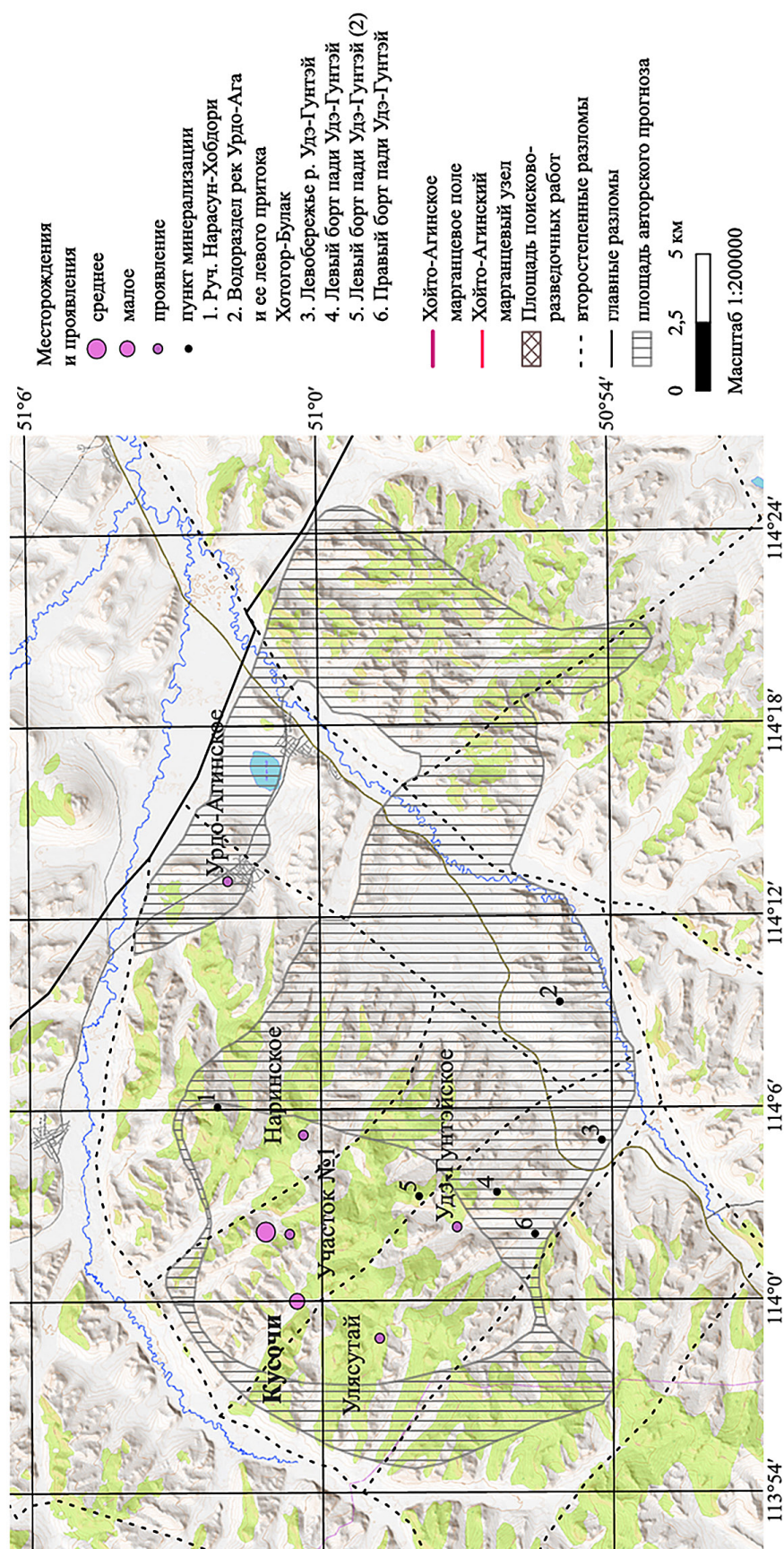


Рис. 3. Площадь авторского прогноза S_x .
Примечание: карта составлена авторами на основе источника [2] с добавлениями: очерчена собственная площадь прогноза, обозначены второстепенные разломы

Распространение минерализации окажет прямое влияние на коэффициент подобия. Распространение минерализации (k_m) является отношением суммы числа месторождений, проявлений и пунктов минерализации к площади. Для прогнозируемой площади $k_m = 0,016$.

Нет доказанной связи между количеством рудопоявлений и объемом руды, однако можно судить о схожести двух рудных объектов по количеству проявлений на единицу площади. Это обусловлено тем, что сами проявления, концентрация полезного компонента, количество проявлений, их рассредоточение по местности определяются глубиной залегания (чем ближе к поверхности, тем больше проявлений фиксируется), геологическими условиями (наличие разломов, зон дробления и др.), деятельностью эрозионных процессов. Коэффициент распространения минерализации k_m объединяет в себе множество характеристик, за счет чего является универсальным.

Для эталонной площади коэффициент распространения минерализации $k_{mi} = 0,12$. Распространение минерализации оценивается относительно эталонной площади по формуле 3.

$$k_{ma} = k_m / k_{mi} = 0,13. \quad (3)$$

Предполагаемый коэффициент подобия K_{es} рассчитывается как среднее между k_c и k_m , т. к. оба коэффициента в равной степени влияют на дальнейшее определение коэффициента подобия. Оценка степени сходства k_c была принята равной 1, т. к. исследуемый и эталонный объекты входят в один рудный узел. Приведем расчет K_{es} .

$$K_{es} = (k_{ma} + k_c) / 2 = 0,6. \quad (4)$$

При определении коэффициента подобия необходимо учитывать особенности оруденения, которые не были учтены в процессе оценки ранее. Авторы видят целесообразность в уменьшении коэффициента подобия K до 0,4. Такое решение обусловлено низкими концентрациями марганца, выявленными в результате поисково-разведочных работ. Несмотря на это, на прогнозной площади наблюдаются схожие с эталонной явления окремнения, брекчирования и омаргачивания, что свидетельствует о существенном сходстве между территориями [18, 19].

Учитывая, что глубина прогноза равна глубине предполагаемого оруденения эталона, рассчитаем ресурсы Q млн т исследуемой площади [15].

$$Q = g \cdot K \cdot S_x = 14,84 \text{ млн т} \quad (5)$$

Подсчитанные ресурсы окисленных руд по категории P_3 для площади S_x составят 14,84 млн т. Учитывая прогнозные ресурсы $C_2 + P_1 + P_2$ в количестве 22,46 млн т для площади поля S_p внутри узла площадью S_u , ресурсы по всему Хойто-Агинскому узлу составят 37,3 млн т. Стоит уточнить, что оценка по категории P_3 связана с долей условностей; это допустимо, ведь категория P_3 характеризует наименьшую степень достоверности.

Результаты исследования и их обсуждение

Перспективы Хойто-Агинского марганцевого узла связаны со слабо изученными пунктами минерализации. Авторы предполагают, что при более тщательном изучении пунктов минерализации геологическими и геофизическими методами есть вероятность найти оруденение с промышленными содержаниями марганцевого компонента.

Авторские подсчеты прогнозных ресурсов показали оценку более высокую, чем оценки предшественников. Для всей площади Хойто-Агинского узла оценка составила 37,3 млн т окисленной руды. Оценка по своему характеру больше является сценарной, поскольку характеризует число предполагаемых ресурсов. Предыдущие исследования говорили об оценке по рудному полю 22,46 млн т и об оценке по рудному узлу по категории P_3 7,3 млн т. Таким образом, общая оценка предыдущих исследований составила 29,76 млн т ($C_2 + P_1 + P_2 + P_3$). Разница между авторскими расчетами и результатами предыдущих исследований составила 7,54 млн т. В этом исследовании была получена оценка ресурсов узла, превышающая ранние оценки.

Заключение

В процессе работы авторов были уточнены результаты предыдущих исследований, предложен альтернативный вариант расчета ресурсов для площади узла.

Хойто-Агинский узел рассматривается как перспективный рудный объект; его перспективность обусловлена фациальными предпосылками. Был предложен и обоснован подход к подсчету ресурсов, в результате которого получена новая оценка предполагаемых прогнозных ресурсов рудного узла. Авторский подход объясняется геологическими условиями размещения оруденения, геохимическими и стратиграфическими характеристиками минерализации, проявленной на поверхности. В результате

исследования были получены новые данные об оценке ресурсов Хойто-Агинского узла, на которые можно опираться при дальнейшем его изучении.

Список литературы

1. Брусницын А. И., Перова Е. Н., Верещагин О. С., Ветрова М. Н. Геохимические особенности и условия накопления марганценовых отложений комплексного (Fe–Mn и BaSO₄–Pb) месторождения Ушкатын-III, Центральный Казахстан // Геохимия. 2021. Т. 66. № 9. С. 818–850. URL: <https://sciencejournals.ru/cgi/getPDF.pl?jid=geokhim&year=2021&vol=66&iss=9&file=GeoKhim2107002Brusnitsyn.pdf> (дата обращения: 22.07.2026). DOI: 10.31857/S0016752521070025.
2. Павленко Ю. В. Глубинное строение и минерализация Юго-Восточного Забайкалья: монография. Чита: ЧитГУ, 2009. 200 с. ISBN: 978-5-9293-0475-0. EDN: ZTOGMX.
3. Брагин В. И., Харитонов М. Ю., Мацко Н. А. Вероятностный подход к оценке динамического бортового содержания // Записки Горного института. 2021. Т. 251. С. 617–625. URL: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/14700> (дата обращения: 22.07.2026). DOI: 10.31897/PMI.2021.5.1.
4. Кириллова Г. Л. Триасовый этап в эволюции мезозойского седиментогенеза Монголо-Охотской складчатой системы // Тихоокеанская геология. 2020. Т. 39. № 2. С. 3–20. URL: http://itig.as.khb.ru/POG/2020/n_2/pdf/Kirillova.pdf (дата обращения: 22.07.2026). DOI: 10.30911/0207-4028-2020-39-2-3-20.
5. Синица С. М., Василенко Е. А., Вильмова Е. С. Литологические и палеонтологические индикаторы климата в мезозое Забайкалья // Вестник Забайкальского государственного университета. 2020. Т. 26. № 1. С. 60–67. URL: <https://zabvestnik.com/wp-content/uploads/070220060246-60-67.pdf> (дата обращения: 22.07.2026). DOI: 10.21209/2227-9245-2020-26-1-60-67.
6. Окунева Т. М. Биостратиграфия триаса Дальнего Востока и Забайкалья // Тихоокеанская геология. 2002. Т. 21. № 6. С. 3–30. URL: http://itig.as.khb.ru/POG/2002/2002_t21_n6.pdf (дата обращения: 22.07.2026).
7. Дриль С. И., Кузьмин М. И., Носкова Ю. В., Зарубина О. В. Изотопные Sm–Nd-характеристики ювенильной коры центральной части Монголо-Охотского орогенного пояса // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2023. Т. 509. № 2. С. 184–189. URL: <https://sciencejournals.ru/cgi/getPDF.pl?jid=danzem&year=2023&vol=509&iss=2&file=DANZem2260281Dril.pdf> (дата обращения: 22.07.2026). DOI: 10.31857/S2686739722602812.
8. Павленко Ю. В., Шивохин Е. А. Минерогенетические факторы и критерии рудоносности доюрского периода Юго-Восточного Забайкалья – основа оценки и прогноза полезных ископаемых // Вестник Читинского государственного университета. 2007. № 1. С. 10–19. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mineragenicheskie-faktory-i-kriterii-rudonosnosti-doyurskogo-perioda-yugo-vostochnogo-zabaykalya-osnova-otsenki-i-prognoza-poleznyh> (дата обращения: 22.07.2026).
9. Hronsky J. M. A., Kreuzer O. P. Applying spatial prospectivity mapping to exploration targeting: Fundamental practical issues and suggested solutions for the future // Ore Geology Reviews. 2019. Vol. 107. P. 647–653. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169136819302203> (дата обращения: 22.07.2026). DOI: 10.1016/j.oregeorev.2019.03.016.
10. Синица С. М., Вильмова Е. С., Вильмова Е. С. Продукты органогенных карбонатов докембрия и фанерозоя Забайкалья // Ученые записки ЗабГУ. Сер. Биологические науки. 2018. Т. 13. № 1. С. 78–92. URL: https://uchzap.com/wp-content/uploads/251120031103-Sinica_Vilmova_Vilmova.pdf (дата обращения: 22.07.2026). DOI: 10.21209/2500-1701-2018-13-1-78-92.
11. Zhang C., Zuo R., Xiong Y., Zhao X., Zhao K. A geologically-constrained deep learning algorithm for recognizing geochemical anomalies // Computers & Geosciences. 2022. Vol. 162. 105100. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098300422000620> (дата обращения: 22.07.2026). DOI: 10.1016/j.cageo.2022.105100.
12. Ефремов С. В., Бибитов А. Г., Гиёсов М. Я., Минкевич Д. С., Цыдыпова С. Б. Оценка флангов рудных месторождений с помощью геохимических съемок по первичным и вторичным ореолам. Первичные ореолы // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2017. Т. 40. № 2(59). С. 36–49. URL: <https://journals.istu.edu/znz/journals/2017/02/articles/03?view=1> (дата обращения: 22.07.2026).
13. Викентьев И. В., Дамдинов Б. Б., Минина О. Р., Спирина А. В., Дамдинова Л. Б. Классификация процессов полиметаллического рудообразования и переходный VMS–SEDEX–MV-тип – пример гигантского озерного месторождения в Забайкалье, Россия // Геология рудных месторождений. 2023. Т. 65. № 3. С. 201–236. DOI: 10.31857/S001677702303005X. EDN: TYICEI. URL: <https://journals.rsci.science/0016-7770/article/view/134676> (дата обращения: 22.07.2026).
14. Петров Г. А. Прогнозирование благороднометаллового оруденения в допалеозойских черносланцевых толщах центральной части Уральского подвижного пояса // Литосфера. 2014. № 6. С. 88–101. URL: <https://www.lithosphere.ru/jour/article/view/394> (дата обращения: 22.07.2026).
15. Методические рекомендации по выделению и обоснованию перспективных участков недр на твердые полезные ископаемые по результатам региональных геолого-геофизических и геологосъемочных работ. ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2018. С. 18–21.
16. Кривогузова А. С., Васютенко Д. М. Анализ применения математического моделирования в геологии // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: физико-математические и технические науки. 2022. № 1. С. 101–107. URL: https://journals.kantiana.ru/upload/iblock/388/13_101-107.pdf (дата обращения: 22.07.2026).
17. Дадькин В. С., Дадькина О. В., Язвенко Н. А. Разработка методики интегральной экспертной оценки перспективности участков недр на основе онтологической модели и нечеткой логики // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334. № 8. С. 182–189. URL: <https://izvestiya.tpu.ru/archive/article/view/4030>. DOI: 10.18799/24131830/2023/8/4030 (дата обращения: 22.07.2026).
18. Zuo R., Cheng Q., Xu Y., Yang F., Xiong Y., Wang Z., Kreuzer O. P. Explainable artificial intelligence models for mineral prospectivity mapping // Science China Earth Sciences. 2024. Vol. 67, Is. 9. P. 2864–2875. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11430-024-1309-9> (дата обращения: 22.07.2026). DOI: 10.1007/s11430-024-1309-9.
19. Wang J., Zuo R., Caers J. Discovering geochemical patterns by factor-based cluster analysis // Journal of Geochemical Exploration. 2017. Vol. 181. P. 106–115. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0375674217301796> (дата обращения: 22.07.2026). DOI: 10.1016/j.gexplo.2017.07.006.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

СТАТЬЯ

УДК 528.8.044.2:528.481
DOI 10.17513/use.38542



CC BY 4.0

МОНИТОРИНГ ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ВДОЛЬ ОРОСИТЕЛЬНОГО КАНАЛА МЕТОДОМ ВРЕМЕННОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Чжан Х. ORCID ID 0009-0001-6661-3606,

Кузнецов Э. Д. ORCID ID 0000-0002-9760-0242, Хань Ц.

*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»,
Екатеринбург, Российская Федерация, e-mail: eduard.kuznetsov@urfu.ru*

Оседание земной поверхности является опасным геологическим процессом, вызываемым комплексом природных и антропогенных факторов. Спутниковая радиоинтерферометрия является одним из важнейших инструментов дистанционного зондирования благодаря всепогодности, независимости от времени суток, высокой проникающей способности и широкому охвату. Цель исследования – анализ динамики оседаний поверхности вблизи оросительных каналов, питающихся от притоков р. Хуанхэ на территории г. Цзююань (Китай) в период с января 2023 г. по март 2025 г. Проведена обработка 59 радарных снимков, полученных спутником Sentinel-1A. С помощью метода спутниковой радиолокационной интерферометрии на основе малых базовых линий выполнен мониторинг оседания поверхности для вычисления скоростей и накопленного оседания земной поверхности вблизи оросительных каналов. Для верификации полученных оценок оседания земной поверхности использованы полевой мониторинг и результаты применения технологии радиолокационной интерферометрии с постоянными отражателями. Выявлен неравномерный характер оседания поверхности в буферной зоне каналов. Основные очаги деформаций расположены в районах населенных пунктов Мочжуан и Гэжэньчжуан. Максимальные значения оседаний наблюдаются в районах, пространственное распределение которых согласуется с гипотезой о возможном влиянии горных работ; максимальное накопленное оседание, зафиксированное по данным SBAS-InSAR, составило -165 мм (по данным геометрического нивелирования – -175 мм). Полученные результаты могут быть использованы для дальнейшего мониторинга состояния линейных гидротехнических объектов и оценки возможного влияния угледобывающей деятельности на оседание поверхности. Исследование демонстрирует эффективность применения технологии InSAR для мониторинга оседания земной поверхности вдоль протяженных инженерных объектов.

Ключевые слова: мониторинг оседания поверхности, накопленное оседание, радиоинтерферометрия, линейные гидротехнические объекты, верификация

MONITORING OF GROUND SURFACE DEFORMATIONS ALONG AN IRRIGATION CANAL USING TIME-DOMAIN RADAR INTERFEROMETRY

Zhang Kh. ORCID ID 0009-0001-6661-3606,

Kuznetsov E. D. ORCID ID 0000-0002-9760-0242, Khan Ts.

*Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education
“Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin”,
Yekaterinburg, Russian Federation, e-mail: eduard.kuznetsov@urfu.ru*

Land subsidence is a dangerous geological process caused by a combination of natural and anthropogenic factors. Satellite radio interferometry is one of the most important remote sensing tools due to its all-weather, day/night independence, high penetrating power, and wide coverage. Aims. To analyze the dynamics of surface displacements near irrigation canals fed by tributaries of the Yellow River in Jiyuan City, China, from January 2023 to March 2025. We processed 59 Sentinel-1A satellite images. Employing the Small Baseline Subset Interferometric Synthetic Aperture Radar algorithm, the study maps out the velocities and cumulative surface subsidence deformation adjacent to critical water supply channels sourced from the Yellow River tributaries. We used Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar technology and field monitoring to support verification of the Earth's surface deformation results. The findings reveal highly uneven subsidence patterns across the monitored area. Two prominent deformation hotspots were identified, clustered primarily around the settlements of Mozhuang and Gezhenzhuang. The maximum deformation values were observed in areas where the spatial distribution of deformation is consistent with the hypothesis of a possible influence of mining activities, with the maximum cumulative subsidence recorded by SBAS-InSAR data was -165 mm (-175 mm according to geodetic leveling data). The results can provide valuable information for continuous monitoring of linear hydraulic engineering structures and for assessing the potential impact of coal mining activities on surface deformation. This study demonstrates the effectiveness of InSAR technology for monitoring surface deformation along long linear engineering structures.

Keywords: ground subsidence monitoring, cumulative surface subsidence, radar interferometry, verification, linear hydraulic structures

Введение

Оседание земной поверхности является опасным геологическим процессом, который провоцируется комплексом природных и антропогенных факторов, приводя к понижению высотных отметок местности [1]. Данное явление трудно поддается оперативному обнаружению, носит зачастую необратимый характер и влечет за собой масштабные риски, включая невозполнимые экологические потери, угрозу безопасности населения и разрушение городской инфраструктуры. Деформации рельефа напрямую зависят от интенсивности хозяйственной деятельности: урбанизации, активного извлечения углеводородов и подземных вод, добычи полезных ископаемых, а также строительства подземных транспортных сетей [2]. Эти процессы спровоцировали критические оседания поверхности во множестве китайских мегаполисов и провинций [3].

По статистическим данным, свыше 100 городов и регионов КНР страдают от оседания грунтов, при этом наиболее сложная ситуация наблюдается на Великой Китайской равнине, в дельте р. Янцзы и бассейне р. Фэнхэ [4]. Прямой экономический ущерб от этих катастроф оценивается в десятки миллиардов юаней ежегодно. Территории среднего и нижнего течения р. Хуанхэ, расположенные на Великой Китайской равнине, демонстрируют одни из самых высоких темпов оседания поверхности в стране. Подобные оседания грунта способны инициировать образование карстовых воронок, провалов, оползней и глубоких трещин [5].

За последние годы активная разработка угольных месторождений вблизи сельскохозяйственных водотоков привела к локальным оседаниям, что вызывает регулярные повреждения гидротехнической инфраструктуры каналов и огромные экономические потери [6]. В связи с этим возникает острая необходимость в организации долгосрочного и непрерывного мониторинга деформаций вокруг ирригационных объектов для получения точных данных о динамике процесса, его пространственном распределении и причинах возникновения.

Исторически для мониторинга деформаций земной поверхности широко применялись классические геодезические методы, включая нивелирование и ГНСС-измерения. Они обеспечивают высокую точность локальных наблюдений, однако требуют проведения наземных измерений и имеют ограниченный пространственный охват. Поэтому космическая радиолокационная

интерферометрия может использоваться как дополнительный инструмент комплексного деформационного мониторинга горных территорий [7].

Спутниковая интерферометрия на основе съемки с помощью радара с синтезированной апертурой (InSAR) стала важнейшим инструментом дистанционного зондирования благодаря своей всепогодности, независимости от времени суток, высокой проникающей способности и широкому охвату. Тем не менее классический метод InSAR подвержен ошибкам из-за атмосферных искажений и пространственно-временной декорреляции. Для преодоления этих ограничений при анализе длительных временных рядов были разработаны специализированные алгоритмы: PS-InSAR, SBAS-InSAR [8, 9].

В методе SBAS-InSAR формируется сеть интерферограмм на основе комбинаций снимков с минимальными пространственными и временными базисами. За счет пространственной фильтрации фазы и анализа средней когерентности выделяются медленно декоррелирующие пиксели (SDFP), сохраняющие стабильность фазы на коротких интервалах. Использование пикселей SDFP позволяет компенсировать погрешности цифровой модели рельефа (DEM) и атмосферные шумы, обеспечивая расчет высокоточных полей деформаций на значительных территориях. Методики многовременной радиолокационной интерферометрии применяются для мониторинга оседаний земной поверхности, в том числе в районах горных работ и на территориях, подверженных различным геодинамическим процессам [10, 11].

Цель исследования – мониторинг оседаний поверхности вблизи ирригационных каналов, питающихся от притоков р. Хуанхэ на территории г. Цзиюань (Китай), по радиолокационным изображениям, полученным спутником Sentinel-1A в интерферометрическом режиме съемки в период с января 2023 г. по март 2025 г.

Материалы и методы исследования

Алгоритм SBAS-InSAR был первоначально предложен Berardino и соавт. [8] и впоследствии развит в работах Lanari и соавт. [9]. Суть метода заключается в комбинировании SAR-снимков для формирования избыточной сети пар с короткими пространственными и временными базовыми линиями. Это минимизирует изолированность кластеров данных и повышает частоту временной дискретизации. Для пре-

одоления проблемы вырожденности матриц применяется метод сингулярного разложения (SVD), позволяющий найти решение системы линейных уравнений по критерию наименьших квадратов и восстановить хронологию скоростей оседаний за весь период наблюдений.

Из набора $N + 1$ радарных изображений исследуемой территории, полученных в моменты времени $t_0, t_1, \dots, t_N$, выбирается единое главное изображение, с которым совмещаются все остальные сцены. На основе этих данных синтезируется M дифференциальных интерферограмм, количество которых ограничивается условием

$$\frac{N+1}{2} \leq M \leq \frac{N(N+1)}{2}.$$

Для интерферограммы с индексом i , образованной парой снимков за даты t_a и t_b ($t_b > t_a$), после исключения топографической фазы и фазы плоской Земли, разность фаз в координатах азимута x и наклонной дальности r описывается выражением

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_i(x, r) &= \varphi(t_b, x, r) - \varphi(t_a, x, r) = \\ &= \frac{4\pi}{\lambda} [d(t_b, x, r) - d(t_a, x, r)], \end{aligned}$$

где λ – длина волны радара; $d(t_b, x, r)$ и $d(t_a, x, r)$ – суммарные накопленные оседания вдоль линии визирования (LOS) на моменты t_b и t_a относительно начальной эпохи t_0 ; $\varphi(t_b, x, r)$ и $\varphi(t_a, x, r)$ – соответствующие фазовые вклады деформаций.

Средняя скорость оседания поверхности, получаемая на основе измерения разности фаз между двумя пролетами спутника, равна

$$v_i = \frac{\varphi(t_b, x, r) - \varphi(t_a, x, r)}{t_b - t_a}.$$

Интерферометрическую фазу i -й интерферограммы можно представить в виде интегральной суммы от скорости оседания поверхности:

$$\sum_{k=a}^{b-1} (t_{k+1} - t_k) v_k = \delta\varphi_i.$$

Запишем приведенное выше уравнение в матрично-векторной форме:

$$Av = \delta\varphi.$$

где A – топологическая матрица размером $M \times N$, а $\delta\varphi$ – вектор развернутых фаз M

интерферограмм. В случае единого связанного графа ($M \geq N$) ранг матрицы равен N , и система решается классическим методом наименьших квадратов. При наличии разрывов в графе ($M < N$) применяется SVD-разложение для поиска решения с минимальной нормой вектора скоростей. Последующее интегрирование этих скоростей позволяет получить кумулятивные оседания для каждой временной эпохи [12].

Основы метода PS-InSAR. Используется несколько одновидовых SAR-снимков, покрывающих одну и ту же исследуемую территорию. Среди снимков выбирается один основной, с которым совмещаются все остальные SAR-снимки. Для временной последовательности SAR-снимков выполняется анализ стабильности амплитудных и/или фазовых характеристик пикселей и выбираются цели – постоянные отражатели (Persistent Scatterer, PS). После интерферометрической обработки и удаления топографического эффекта получается дифференциальная интерферометрическая фаза для целей – постоянных отражателей, и затем выполняется повторное дифференцирование дифференциальной интерферометрической фазы соседних целей – постоянных отражателей. Далее, исходя из различных характеристик фазовых компонент после двойного дифференцирования, строится модель фазы деформации с применением методов пространственно-временной фильтрации для оценки параметров деформации и остаточных ошибок рельефа [13].

Технология PS-InSAR не выполняет обработку данных для всех пикселей на снимках SAR, а выбирает в качестве объектов наблюдения точки PS, которые характеризуются относительно стабильными рассеивающими свойствами во времени и сильными эхо-сигналами [14].

Результаты обработки PS-точек могут служить ориентиром для выбора наземных контрольных точек (GCP) при коррекции орбит в процессе SBAS, тем самым позволяя выбирать стабильные участки.

Обзор источников SAR-данных и районов исследования

Миссия Sentinel-1, реализуемая Европейским космическим агентством (ЕКА) в рамках программы Copernicus, предоставляет данные высокого разрешения с различными углами падения и вариантами поляризации. Спутник Sentinel-1 обеспечивает широкий пространственный охват территории исследования; для рассматриваемых

данных использовался режим TOPS (Terrain Observation with Progressive Scans) [15]. В данной работе используется 59 SLC-снимков, полученных спутником Sentinel-1A (режим съемки IW, поляризация VV, восходящий виток) в интерферометрическом режиме съемки за период с января 2023 г. по март 2025 г. (в среднем по две сцены ежемесячно). Для устранения орбитальных погрешностей применялись файлы точных эфемерид (POD) от ЕКА с сантиметровой точностью. Топографическая фаза моделировалась и вычиталась на основе цифровой модели рельефа SRTM (разрешение 30 м) [16], имеющей точность по высоте порядка 16 м. Для обработки данных в работе использовалось специализированное программное обеспечение ENVI v.5.6.3 с модулем интерферометрической обработки SARscape v.5.6.2.

Исследуемый район расположен в пограничной зоне между уездом Янчэн (кит. 阳城县, англ. Yangcheng County), входящим в состав городского округа Цзиньчэн провинции Шаньси, и городским округом Цзюань (кит. 济源市, англ. Jiyuan City) (провинция Хэнань). Территория локализована на юго-востоке провинции Шаньси, в предгорьях хребтов Тайханшань и Тайюэшань, в бассейне реки Циньхэ (приток первого порядка р. Хуанхэ). Географические координаты района исследований: 112°25'–112°45' в. д. и 35°05'–35°20' с. ш. Общая площадь

района составляет около 1968 км², из которых порядка 30 % отведены под пахотные угодья, орошаемые за счет притоков Хуанхэ. Эффективность сельского хозяйства напрямую зависит от развитой сети водоканалов (рис. 1). Регион обладает богатыми залежами полезных ископаемых. В районах подземной добычи угля наблюдение за оседанием земной поверхности имеет особое значение с точки зрения оценки потенциальных рисков для объектов инфраструктуры [17].

Обработка данных

Обработка радарных данных Sentinel-1 методом SBAS-InSAR для расчета оседаний грунта в округе Цзюань за 2023–2025 гг. проводилась в несколько этапов.

Шаг 1. Пространственное кадрирование: чтобы снизить вычислительную нагрузку, исходные SLC-кадры были обрезаны строго по границам зоны интереса.

Шаг 2. Формирование интерферометрических пар: В качестве мастер-снимка использовалась сцена от 30 января 2024 г. При формировании интерферометрических пар максимальная временная база составляла 120 дней, а перпендикулярная пространственная база ограничивалась 150 м с дополнительным порогом 2 % от критической базовой линии. В результате были сформированы 194 интерферометрические пары.

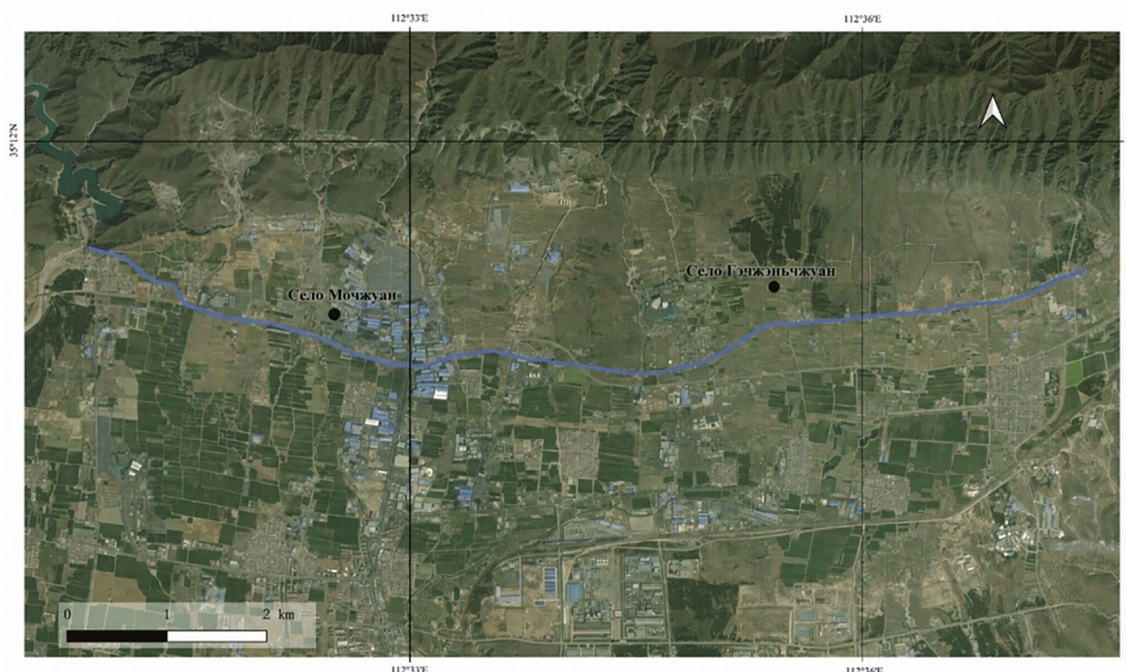


Рис. 1. Спутниковое изображение исследуемого района. Синей линией показан канал
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Шаг 3. Интерферометрия: Проведено субпиксельное совмещение изображений. Топографическая составляющая фазы исключена с использованием 30-метровой ЦМР SRTM v3 [16]. После компенсации плоской фазы по эфемеридам был применен фильтр Гольдштейна для подавления спекл-шума. Фазовая развертка реализовывалась алгоритмом минимальной стоимости потока (MCF) с порогом когерентности 0.2.

Шаг 4. Для устранения остаточных фазовых трендов использовалась относительно стабильная референсная область, выбранная за пределами основных зон деформации и участков горных работ.

Шаг 5. Инверсия деформаций: Выполнен расчет линейных скоростей оседаний и коррекция ошибок ЦМР методом наименьших квадратов. Атмосферная задержка нивелировалась пространственным (окно 1600 м) и временным (окно 365 дней) фильтрованием.

Шаг 6. Геокодирование: Финальные деформации вдоль линии визирования (LOS) были преобразованы из радарной геометрии в систему координат WGS 84 / UTM Zone 49N с пространственным разрешением 15 м.

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ оседания грунта в районе исследования

С помощью метода PS-InSAR построена цветокодированная карта среднегодовых вертикальных скоростей оседания поверхности вдоль оросительного канала за период с января 2023 г. по март 2025 г. (рис. 2). Поскольку скорость оседания в целевой области превышает предел обнаружения InSAR (например, величина оседания составляет более половины длины волны радара в течение цикла выборки), когерентность снижается, что приводит к «исчезновению» точек PS в зонах наиболее интенсивных оседаний. Поэтому результаты технологии PS-InSAR позволяют выявить две зоны оседания, однако они не являются наглядными и служат лишь в качестве ориентира и вспомогательной проверки для результатов технологии SBAS-InSAR.

Карта среднегодовых вертикальных скоростей оседания поверхности вдоль ирригационного канала за период с января 2023 г. по март 2025 г., построенная в результате применения алгоритма SBAS-InSAR, приведена на рис. 3.

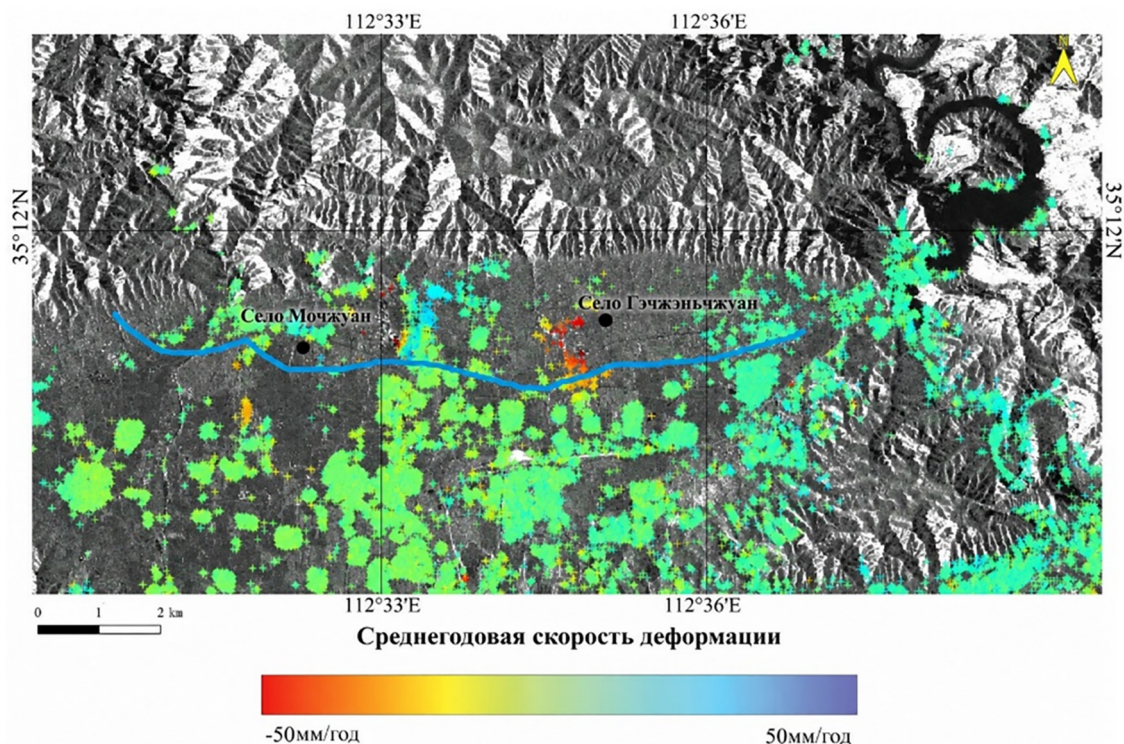


Рис. 2. Среднегодовая скорость деформации земной поверхности в исследуемом районе на основе технологии PS-InSAR
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

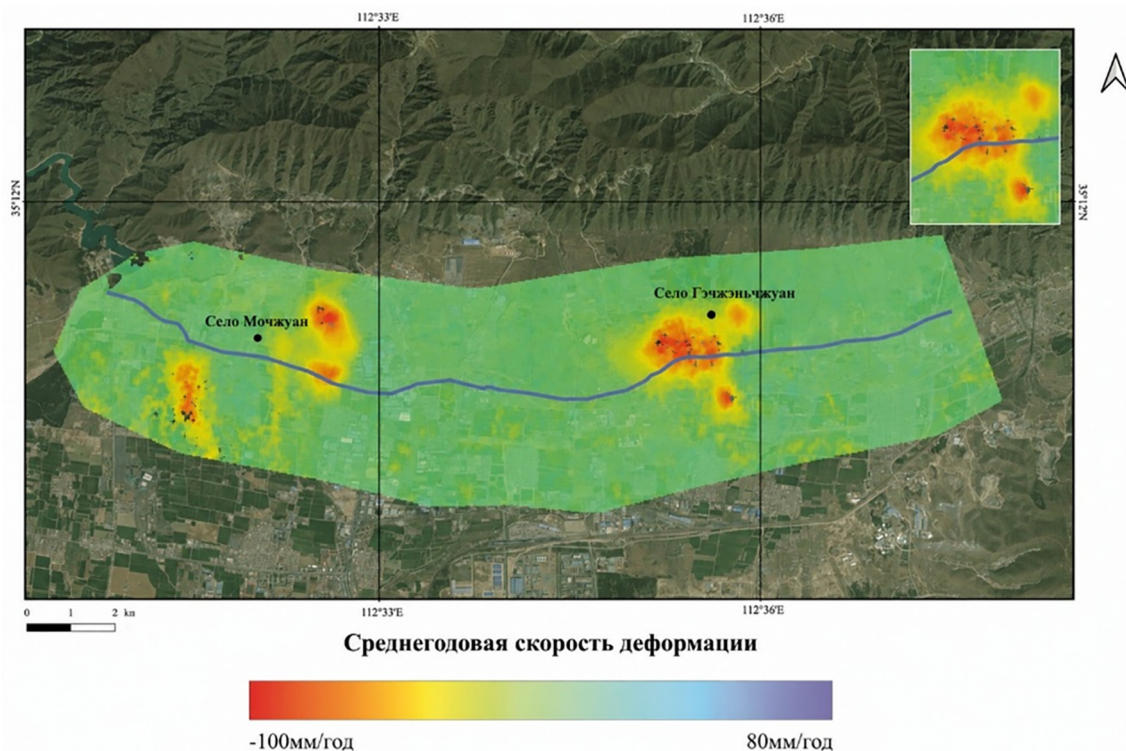


Рис. 3. Среднегодовая скорость деформации поверхности в исследуемом районе, по данным SBAS-InSAR
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Скорости деформации варьируются в диапазоне от -100 мм/год (оседание) до +80 мм/год (поднятие). Красные и желтые пиксели соответствуют участкам критических оседаний поверхности, зелеными пикселями показан устойчивый рельеф, сине-фиолетовыми – локальные возвышения.

Пространственный анализ выявил две ключевые аномальные зоны:

1. Западный сектор (окрестности с. Мочжуан, 磨庄, Mozhuang Village, координаты 35°11' N, 112°32' E), который характеризуется умеренной, но системной динамикой оседания грунтов.

2. Восточный сектор (район с. Гэчжэньчжуан, 圪针庄, Gezhenzhuang Village, координаты 35°11' N, 112°35' E), демонстрирующий экстремальное оседание, скорость которого достигает -100 мм/год.

Сопоставление полученных карт с полевыми данными подтверждает, что эпицентры деформаций совпадают с контурами шахтных полей. Полученные результаты пространственного распределения согласуются с гипотезой о влиянии подземных горных работ: выемка угольных пластов приводит к перераспределению горного давления и последующему оседанию пере-

крывающих пород. Образование подземных полостей техногенного/природного происхождения (генезис не устанавливался) провоцирует пролонгированные оседания слоев. Остальная территория (зеленые тона) остается стабильной, если не считать отдельных участков поднятий, обусловленных геоморфологическими причинами. Такая картина делает необходимым непрерывный геодинамический мониторинг канала, чтобы избежать повреждения инфраструктуры.

Анализ временного ряда деформаций в западном районе (вблизи с. Мочжуан)

Чтобы оценить кинематику процесса в северо-западном очаге (в районе с. Мочжуан), была выбрана характерная точка и выполнен анализ ее оседаний, полученных с использованием геометрического нивелирования и по данным SBAS-InSAR и PS-InSAR (рис. 4). Для пространственной привязки временных серий деформаций использованы точные координаты контрольной точки: по данным SBAS-InSAR (35.18322° N, 112.56197° E), PS-InSAR (35.18323° N, 112.56197° E) и данным геометрического нивелирования (35.18000° N, 112.56000° E).

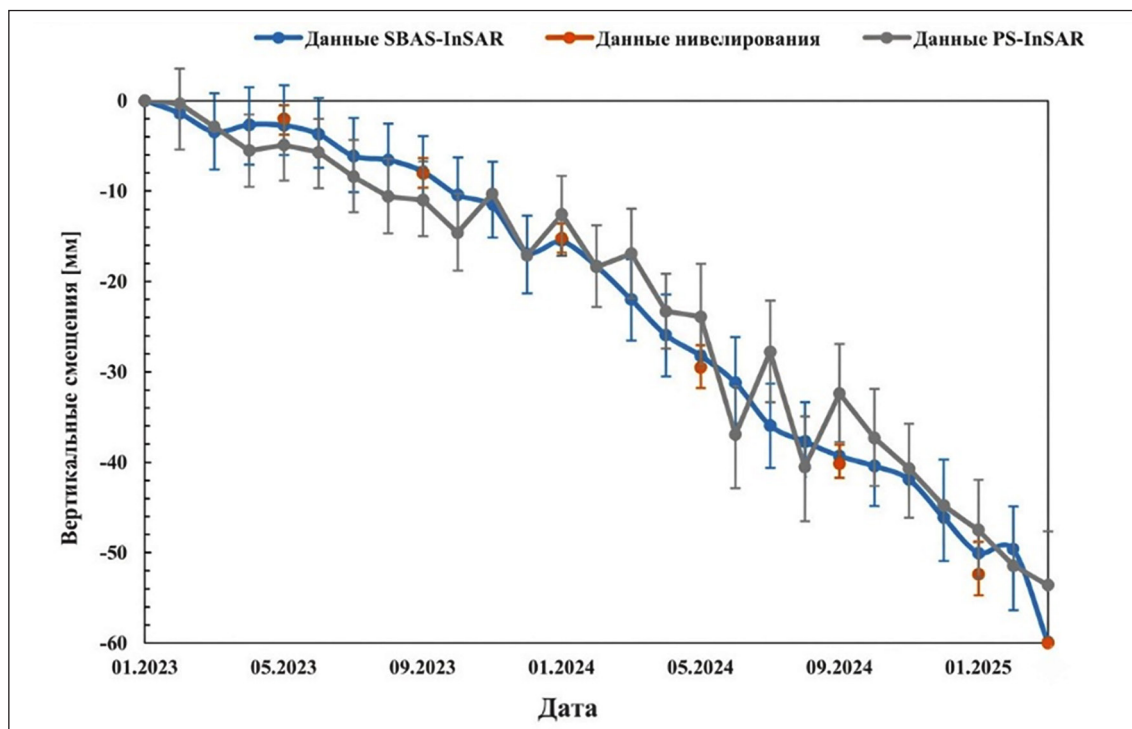


Рис. 4. Анализ изменения высот характерных точек в западном районе (вблизи с. Мочжуан) оседания поверхности

Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Незначительное пространственное расхождение между точкой нивелирования и радарными точками обусловлено расположением реперов государственного геодезического пункта. Среднеквадратическая погрешность (σ) для результатов радарной интерферометрии оценивается на основе некогерентного шума и остаточных атмосферных помех: для технологии SBAS-InSAR типичная точность определения вертикальных оседаний в условиях горных районов и зон активных деформаций составляет порядка ± 5 мм, для PS-InSAR – около ± 6 мм. Для высокоточного геометрического нивелирования II класса погрешность определения высот не превышает ± 2 мм. Графики на рис. 4 отражают накопленное оседание за 2023–2025 гг. Данные SBAS-InSAR сравниваются с результатами геометрического нивелирования и PS-InSAR. Сопоставление показало высокую сходимость радиолокационных и наземных геодезических измерений, что свидетельствует о надежности спутникового подхода.

В данной точке наблюдается устойчивое оседание поверхности. Накопленное оседание превысило 65 мм, при этом скорость оседания поверхности со временем изменялась. Наиболее резкий скачок за-

фиксирован между сентябрем 2023 г. и сентябрем 2024 г., что пространственно совпадает с зонами интенсивной подземной добычи. Пространственная корреляция между границами горных отводов и контурами мульды сдвижения согласуется с гипотезой о техногенном характере происходящих оседаний. Прямая пространственная связь между горноотводами и контурами мульды сдвижения предположительно указывает на техногенный фактор оседаний. Эти риски диктуют необходимость упреждающих инженерных мероприятий для защиты поселений и канала.

Анализ временного ряда деформаций в восточном районе (вблизи с. Гэчжэньчжуан)

Аналогичный хронологический анализ был проведен для маркерной точки в центрально-восточной части (район с. Гэчжэньчжуан), где зафиксирован наиболее опасный очаг (рис. 5). Пространственная привязка используемых временных серий выполнена по следующим географическим координатам: SBAS-InSAR (35.18346° N, 112.59223° E), PS-InSAR (35.18346° N, 112.59222° E) и данным геометрического нивелирования (35.18000° N, 112.59000° E).

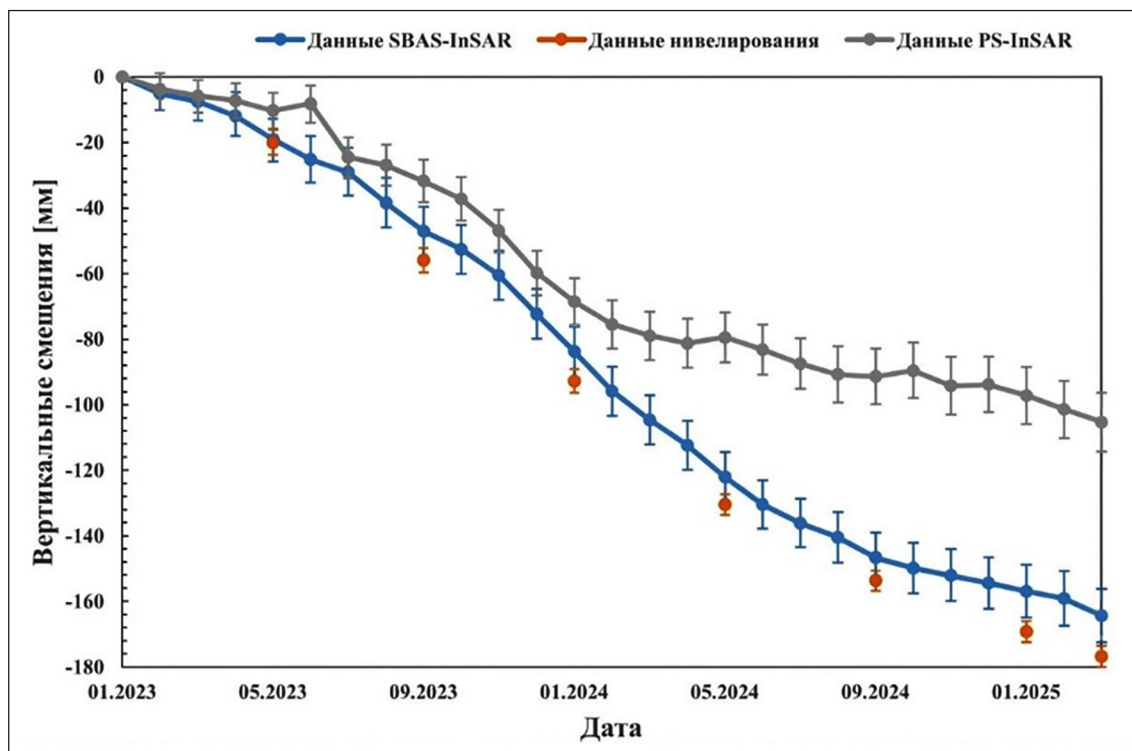


Рис. 5. Анализ изменения высоты характерной точки в центрально-восточном районе (вблизи с. Гэчжэньчжуан) оседания поверхности
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Небольшое удаление геодезического репера нивелирования от интерферометрических точек (~440 м) обусловлено фактической сеткой расположения реперов. Анализ графиков на рис. 5 показывает, что значения оседания по данным PS-InSAR значительно меньше по абсолютной величине по сравнению с данными SBAS-InSAR и данными геометрического нивелирования. Технология PS-InSAR опирается исключительно на постоянные рассеиватели (PS-точки), которые, как правило, относятся к стабильным объектам (здания, выходы скальных пород и т. п.) и могут не отражать полной величины деформации, особенно в зонах интенсивного оседания. На участках с наибольшими скоростями деформаций PS-точки часто теряются из-за декорреляции, что ведет к занижению оценок оседания поверхности. SBAS-InSAR, напротив, задействует более плотную пиксельную сетку, включая некогерентные области, и дает картину, лучше согласующуюся с реальными деформациями, что подтверждается результатами нивелирования.

Максимальное накопленное оседание, зафиксированное по данным SBAS-InSAR, составило -165 мм (по данным геодезиче-

ского нивелирования – -175 мм). Для оценки точности результатов учитывались характерные неопределенности применяемых методов: около ± 5 мм для SBAS-InSAR, ± 6 мм для PS-InSAR и ± 2 мм для геометрического нивелирования. Подобная равномерность оседаний характерна для продолжительного и устойчивого техногенного давления. Пространственная близость действующих угольных шахт согласуется с гипотезой об оседании поверхности в результате прогиба вышележащей толщи пород под влиянием подземной добычи. В непосредственной близости от гидротехнических коммуникаций и жилой застройки такие скорости оседаний представляют критическую опасность. В связи с этим зона в окрестности с. Гэчжэньчжуан нуждается в постоянном мониторинге и оперативной оценке структурных рисков.

Применение SBAS-InSAR для исследования бассейна притоков р. Хуанхэ в границах округа Цзюань показало, что эта технология пригодна для высокоточного пространственного анализа движений земной коры. Использование сингулярного разложения (SVD) позволило успешно справиться с разрывами интерферометрических

связей и корректно рассчитать скорости оседаний на основе принципа минимальной нормы. Полученные карты мульд сдвижения хорошо согласуются с геологическими и техногенными условиями провинции.

Анализ маркерных пикселей показал, что среднегодовые скорости оседания составляют от 30 до 100 мм/год. Согласно нормативным требованиям (например, «Спецификации по оценке риска геологических опасностей» Министерства природных ресурсов КНР, http://www.cigem.cgs.gov.cn/tzgg_4890/201806/W020180605531374031168.pdf), территории со скоростью оседания поверхности более 20 мм/год относятся к зоне повышенного риска и требуют стабилизационных мер. Спутниковые измерения и материалы наземных съемок дают согласованные оценки оседаний. Обнаруженные оседания являются следствием деятельности угольных шахт.

При изучении быстрых и интенсивных оседаний технология PS-InSAR уступает SBAS-InSAR по нескольким параметрам. Прежде всего, PS-InSAR привязан к одному мастер-снимку, и при высоких скоростях оседания поверхности сигнал теряет когерентность, развертка фазы срывается, а точные измерения становятся невозможными; SBAS-InSAR, напротив, использует пары с малыми разностями по времени и уверенно фиксирует даже быстрые изменения. Далее, PS-InSAR опирается исключительно на стабильные жесткие объекты – здания, элементы инфраструктуры, – из-за чего на открытых участках максимальных оседаний поверхности (шахтные поля, карьеры, поля) образуются «слепые зоны»; SBAS-InSAR в этих местах работает непосредственно по грунту и обеспечивает высокую плотность данных. Наконец, алгоритм PS-InSAR ориентирован на выделение линейных трендов и часто отбрасывает резкие скачкообразные провалы как шум, тогда как SBAS-InSAR способен восстанавливать нелинейный характер деформаций, что делает его незаменимым инструментом при анализе сложных геодинамических процессов на горнопромышленных территориях.

Перспективным направлением будущих изысканий является расчет 3D-векторов деформаций, включая горизонтальные компоненты оседания грунтов. Также следует отметить, что во всех современных пакетах обработки SAR-данных остаются нерешенными вопросы, связанные со специфическими фазовыми скачками при развертке и артефактами ЦМР. Дальнейшая модер-

низация алгоритмической базы позволит еще точнее реконструировать геодинамику сложных территорий.

Ограничения исследования. Несмотря на высокую эффективность методов временной радиолокационной интерферометрии (SBAS-InSAR и PS-InSAR) для мониторинга оседаний земной поверхности, полученные результаты имеют ряд ограничений, связанных с особенностями дистанционного зондирования и характеристиками исходных данных.

Во-первых, точность определения деформаций методом InSAR зависит от уровня пространственно-временной когерентности радарных изображений. В районах с интенсивными деформациями, изменением поверхности, растительным покровом или антропогенным воздействием может происходить потеря когерентности, что приводит к уменьшению количества надежных интерферометрических точек и снижению точности оценки оседаний. Особенно это актуально для зон активного оседания, где высокие скорости деформаций могут превышать пределы устойчивого фазового измерения.

Во-вторых, получаемые методом InSAR оседания первоначально определяются в направлении линии визирования спутника (Line of Sight, LOS). Поэтому преобразование LOS-смещений в вертикальные перемещения поверхности содержат ошибки, обусловленные геометрией наблюдений и возможным наличием горизонтальных компонентов движения. В настоящем исследовании основное внимание уделено вертикальным деформациям, поскольку исследуемый процесс оседания поверхности преимущественно имеет вертикальный характер, однако влияние горизонтальных перемещений полностью исключить невозможно.

В-третьих, точность результатов зависит от качества цифровой модели рельефа, используемой при интерферометрической обработке. Ошибки ЦМР могут вызывать остаточные фазовые компоненты и влиять на оценку величины оседаний, особенно в районах со сложным рельефом. Для минимизации данного влияния применялись методы пространственно-временной фильтрации и оценки остаточных фазовых ошибок в процессе обработки SBAS-InSAR.

Кроме того, на результаты InSAR могут оказывать влияние атмосферные задержки, связанные с изменением температуры, влажности и давления в атмосфере. Несмотря на применение методов пространственно-временной фильтрации, полностью

исключить атмосферные эффекты невозможно, что может приводить к появлению локальных остаточных деформационных сигналов.

Наконец, независимая наземная проверка результатов ограничена количеством доступных геодезических измерений. В связи с отсутствием плотной сети наземного мониторинга оценка точности результатов основана на сравнении отдельных контрольных точек SBAS-InSAR, PS-InSAR и геометрического нивелирования. В дальнейшем увеличение количества наземных контрольных измерений и интеграция различных методов мониторинга позволят повысить надежность оценки процессов оседания поверхности.

Таким образом, результаты исследования следует рассматривать с учетом указанных ограничений. Несмотря на существующие источники неопределенности, пространственно-временное распределение выявленных зон оседания и согласованность результатов, получаемых различными методами, позволяют использовать технологию SBAS-InSAR для эффективного мониторинга деформаций поверхности вдоль линейных гидротехнических объектов.

В настоящем исследовании отсутствуют достаточно полные временные ряды уровня грунтовых вод, осадков и детальные геологические данные, поэтому количественная оценка их вклада в формирование деформаций не проводилась. Возможное влияние тектонических нарушений также не исключается и требует отдельного геолого-геофизического анализа.

Заключение

Исследование выявило неоднородное пространственное распределение оседаний земной поверхности в районе исследуемого оросительного канала. Наиболее выраженные зоны вертикальных оседаний расположены вблизи населенных пунктов Мочжуан и Гэчжэньжуан. Максимальное накопленное оседание, зафиксированное по данным SBAS-InSAR, составило -165 мм (по данным геометрического нивелирования – -175 мм).

Пространственное совпадение зон интенсивных оседаний с контурами угольных выработок согласуется с гипотезой о возможном влиянии подземной добычи угля на динамику земной поверхности. Вместе с тем детализированные временные данные о динамике горных работ в настоящем исследовании отсутствуют, поэтому

временная корреляция между интенсивностью добычи и изменением деформаций не устанавливалась.

Другие факторы, включая изменения уровня грунтовых вод, атмосферные осадки, инженерно-геологические условия и другие природные процессы, также могут влиять на динамику деформаций, однако их индивидуальный вклад в рамках настоящего исследования количественно не оценивался.

Выявленные деформационные аномалии являются основанием для проведения детального инженерного обследования участка канала и продолжения систематического мониторинга.

Полученные результаты демонстрируют возможность эффективного применения метода SBAS-InSAR для мониторинга деформаций земной поверхности вдоль линейных гидротехнических объектов.

Список литературы

1. Смольянинова Е. И., Михайлов В. О., Дмитриев П. Н. Интерактивная карта активных оползневых участков и зон проседания грунтов для Центрального и Адлерского районов Большого Сочи по данным спутниковой радарной интерферометрии за 2015–2021 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 4. С. 141–149. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-141-149.
2. Zheng M., Deng K., Fan H., Du S. Monitoring and analysis of surface deformation in mining area based on InSAR and GRACE // Remote Sensing. 2018. Vol. 10. Is. 9. Art. 1392. P. 1–20. DOI: 10.3390/rs10091392.
3. Ma Y. Y., Zuo X. Q., Ma W. F. Settlement monitoring and analysis of Tianjin area based on PS-InSAR // Remote Sensing Technology and Application. 2019. Vol. 34. Is. 6. P. 1324–1331. DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2019.6.1324.
4. Xia Y. P., Wang Y. J., Du S., Liu X. X., Zhou H. Y. Integration of D-InSAR and GIS technology for identifying illegal underground mining in Yangquan District, Shanxi Province, China // Environmental Earth Sciences. 2018. Vol. 77. Art. 319. DOI: 10.1007/s12665-018-7488-1.
5. Tong Y. X., Yang J. Q., Wang X., Tan K. Land subsidence monitoring and spatiotemporal evolution characteristics analysis of Datong Coalfield, Shanxi Province based on time series InSAR // Geology in China. 2024. Vol. 51. Is. 1. P. 170–183. DOI: 10.12029/gc20221215001.
6. Wang L., Deng K., Zheng M. Research on ground deformation monitoring method in mining areas using the probability integral model fusion D-InSAR, sub-band InSAR and offset-tracking // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2020. Vol. 85. Art. 101981. P. 1–13. DOI: 10.1016/j.jag.2019.101981.
7. Пономаренко М. Р., Кутепов Ю. И., Волков М. А., Гринюк А. П. Космические методы в составе комплексного деформационного мониторинга земной поверхности горного предприятия // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 12. С. 103–113. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-12-0-103-113.
8. Berardino P., Fornaro G., Lanari R., Sansosti E. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2002. Vol. 40. Is. 11. P. 2375–2383. DOI: 10.1109/TGRS.2002.803792.
9. Lanari R., Mora O., Manunta M., Mallorqui J. J., Berardino P., Sansosti E. A small-baseline approach for investigating deformations on full-resolution differential SAR interferograms

- // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2004. Vol. 42. Is. 7. P. 1377–1386. DOI: 10.1109/TGRS.2004.828196.
10. Шевчук Р. В., Маневич А. И., Акматов Д. Ж., Лосев И. В., Камаев А. А. Применение спутниковой радарной интерферометрии для анализа смещений земной поверхности // Горная промышленность. 2025. № 6. С. 97–104. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-6-97-104.
11. Milczarek W. Application of a small baseline subset time series method with atmospheric correction in monitoring results of mining activity on ground surface and in detecting induced seismic events // Remote Sensing. 2019. Vol. 11. Is. 9. Art. 1008. P. 1–23. DOI: 10.3390/rs11091008.
12. Xiong W., Sun Z. J., Zhang B. C. Surface subsidence monitoring in Tianjin based on ascending and descending time series InSAR technology // Geospatial Information. 2021. Vol. 19. Is. 12. P. 45–49.
13. Ferretti A., Prati C., Rocca F. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2000. Vol. 38. Is. 5. P. 2202–2212. DOI: 10.1109/36.868878.
14. Ferretti A., Prati C., Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2001. Vol. 39. Is. 1. P. 8–20. DOI: 10.1109/36.898661.
15. European Space Agency (ESA). Sentinel-1 Product Specification. Document reference S1-RS-MDA-52-7441. Is. 3/13. Date: 14.10.2022. Frascati: ESA ESRIN. URL: <https://sentinels.copernicus.eu> (дата обращения: 15.05.2025).
16. NASA JPL. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Global 1 Arc-Second V003 / NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC). USGS. 2013. DOI: 10.5067/MEaSUREs/SRTM/SRTMGL1.003.
17. Huang J. L., Bai Y., Lei S. G., Deng K. Z. Time-series SBAS pixel offset tracking method for monitoring three-dimensional deformation in a mining area // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 118787–118798. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3004460.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.