



ИД «Академия Естествознания»

# УСПЕХИ СОВРЕМЕННОГО ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

Научный журнал

№ 7 2025



# ADVANCES IN CURRENT NATURAL SCIENCES

Scientific journal

No. 7 2025



PH Academy of Natural History

# Успехи современного естествознания

Научный журнал

Журнал издается с 2001 года.

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

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

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

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

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

## ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

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

## Технический редактор

Доронкина Е.Н.

## ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ

*Бизенкова Мария Николаевна*, к.м.н.

## Корректор

Галенкина Е.С.,  
Дудкина Н.А.

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

д.с.-х.н., доцент *Абдулвалеев Р.Р.* (Уфа); д.г.-м.н., проф., *Абилхасимов Х.Б.* (Астана); д.т.н., проф. *Айдосов А.* (Алматы); д.г.-м.н., проф., *Алексеев С.В.* (Иркутск); д.х.н., проф., *Алов В.З.* (Нальчик); д.г.н., проф. *Андреев С.С.* (Ростов-на-Дону); д.г.н., доцент *Андреева Е.С.* (Ростов-на-Дону); д.с.-х.н., доцент *Анищенко Л.Н.* (Брянск); д.с.-х.н., проф. *Байрамбеков Ш.Б.* (Камызяк); д.т.н., проф. *Бейсембаев К.М.* (Караганда); д.т.н., проф. *Белозеров В.В.* (Ростов-на-Дону); д.б.н., доцент *Белоус О.Г.* (Сочи); д.с.-х.н., проф. *Берсон Г.З.* (Великий Новгород); д.г.-м.н., проф. *Бондарев В.И.* (Екатеринбург); д.т.н., профессор *Галкин А.Ф.* (Ухта); д.г.-м.н., проф. *Гавришин А.И.* (Новочеркасск); д.с.-х.н., *Горбачева А.Г.* (Пятигорск); д.с.-х.н., *Горянин О.И.* (Самара); д.г.-м.н., проф. *Гусев А.И.* (Бийск); д.с.-х.н., проф. *Данилин И.М.* (Красноярск); д.б.н., доцент *Долгов А.В.* (Мурманск); д.э.н., проф. *Долятовский В.А.* (Ростов-на-Дону); д.х.н., проф. *Дресвянников А.Ф.* (Казань); д.г.н., проф. *Егорина А.В.* (Усть-Каменогорск); д.т.н., проф. *Ерофеев В.И.* (Томск); д.с.-х.н., проф. *Залесов С.В.* (Екатеринбург); д.с.-х.н., доцент *Захарченко А.В.* (Томск); д.с.-х.н., проф. *Зволинский В.П.* (Волгоград); д.х.н., проф. *Ивашкиевич А.Н.* (Москва); д.б.н., доцент *Кавцевич Н.Н.* (Мурманск); д.т.н., проф. *Калякин С.А.* (Донецк); д.с.-х.н., проф. *Караев М.К.* (Махачкала); д.г.-м.н., проф. *Кашаев А.А.* (Иркутск); д.ф.-м.н., проф. *Кобрунов А.И.* (Ухта); д.г.-м.н., доцент *Копылов И.С.* (Пермь); д.г.-м.н., проф. *Костицын В.И.* (Пермь); д.с.-х.н., проф. *Костылев П.И.* (Зерноград); д.э.н., проф. *Косякова И.В.* (Самара); д.с.-х.н., *Коцарева Н.В.* (Белгород); д.т.н., доцент *Кузяков О.Н.* (Тюмень); д.г.-м.н., проф. *Кучеренко И.В.* (Томск); д.б.н., проф. *Ларионов М.В.* (Саратов); д.г.-м.н., проф. *Лебедев В.И.* (Кызыл); д.ф.-м.н., проф. *Лерер А.М.* (Ростов-на-Дону); д.г.н., проф. *Луговский А.М.* (Москва); д.г.-м.н., проф. *Мельников А.И.* (Иркутск); д.т.н., проф. *Мусаев В.К.* (Москва); д.т.н., доцент *Нехорошева А.В.* (Ханты-Мансийск); д.с.-х.н., *Никитин С.Н.* (Ульяновск); д.с.-х.н., *Оказова З.П.* (Владикавказ); д.с.-х.н., проф. *Партоев К.* (Душанбе); д.с.-х.н., проф. *Петелько А.И.* (Миценск); д.т.н., проф. *Петров М.Н.* (Красноярск); д.т.н., проф. *Пирумян Г.П.* (Ереван); д.с.-х.н., проф. *Проездов П.Н.* (Саратов); д.г.-м.н., проф. *Сакиев К.С.* (Бишкек); д.б.н. *Сибикеев С.Н.* (Саратов); д.с.-х.н., доцент *Сокольская О.Б.* (Саратов); д.т.н., проф. *Степанов В.В.* (Санкт-Петербург); д.т.н., проф. *Тарасенко А.А.* (Тюмень); д.т.н. *Теплухин В.К.* (Октябрьский); д.э.н., проф. *Титов В.А.* (Москва); д.с.-х.н., проф. *Титов В.Н.* (Саратов); д.с.-х.н., проф. *Тихановский А.Н.* (Салехард); д.г.-м.н., проф. *Трофименко С.В.* (Нерюнгри); д.т.н., проф. *Ульрих Е.В.* (Кемерово); д.г.н., проф. *Чодураев Т.М.* (Бишкек); д.с.-х.н., проф. *Шамшиев Б.Н.* (Ош); д.т.н., проф. *Шантарин В.Д.* (Тюмень); д.т.н., проф. *Шатов А.А.* (Уфа); д.ф.-м.н., проф. *Ширанов Д.Ш.* (Улан-Удэ); д.т.н., проф. *Шишелова Т.И.* (Иркутск); д.ф.-м.н., проф. *Шузунов Л.Ж.* (Нальчик); д.г.-м.н., проф. *Юргенсон Г.А.* (Чита); д.г.н., проф. *Яковенко Н.В.* (Воронеж); д.т.н., проф. *Ямалетдинова К.Ш.* (Челябинск)

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 = 0,775

Пятилетний импакт-фактор РИНЦ = 0,368

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, г. Пенза, ул. Лермонтова, 3

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

E-mail

edition@rae.ru

Телефон

+7 (499) 705-72-30

Подписано в печать

30.07.2025

Дата выхода номера

29.08.2025

Формат

60x90 1/8

Усл. печ. л.

10,25

Тираж

1000 экз.

Заказ

УСЕ 2025/7

Распространяется по свободной цене

Подписной индекс в электронном каталоге «Почта России»: П7816

© ООО ИД «Академия Естествознания»

## Advances in current natural sciences

Scientific journal

The journal has been published since 2001.

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

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

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

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

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

### CHIEF EDITOR

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

### Technical editor

Doronkina E.N.

### EXECUTIVE SECRETARY

*Bizenkova Maria Nikolaevna*, Cand. Sci. (Medical)

### Corrector

Galenkina E.S.,

Dudkina N.A.

### EDITORIAL BOARD

D.Sc., Docent *Abdulvaleev R.R.* (Ufa); D.Sc., Prof. *Abilkhasimov Kh.B.* (Astana); D.Sc., Prof. *Aidosov A.* (Almaty); D.Sc., Prof. *Alekseev S.V.* (Irkutsk); D.Sc., Prof. *Atoev V.Z.* (Nalchik); D.Sc., Prof. *Andreev S.S.* (Rostov-on-Don); D.Sc., Docent, *Andreeva E.S.* (Rostov-on-Don); D.Sc., Docent *Anishchenko L.N.* (Bryansk); D.Sc., Prof. *Bayrambekov Sh.B.* (Kamyzyak); D.Sc., Prof. *Beisembaev K.M.* (Karaganda); D.Sc., Prof. *Belozеров V.V.* (Rostov-on-Don); D.Sc., Docent *Belous O.G.* (Sochi); D.Sc., Prof. *Berson G.Z.* (Velikiy Novgorod); D.Sc., Prof. *Bondarev V.I.* (Ekaterinburg); D.Sc., Prof. *Galkin A.F.* (Ukhta); D.Sc., Prof. *Gavrishin A.I.* (Novocherkassk); D.Sc. *Gorbacheva A.G.* (Pyatigorsk); D.Sc. *Goryanin O.I.* (Samara); D.Sc., Prof. *Gusev A.I.* (Biysk); D.Sc., Prof. *Danilin I.M.* (Krasnoyarsk); D.Sc., Docent *Dolgov A.V.* (Murmansk); D.Sc., Prof. *Dolyatovsky V.A.* (Rostov-on-Don); D.Sc., Prof. *Dresvyannikov A.F.* (Kazan); D.Sc., Prof. *Egorina A.V.* (Ust-Kamenogorsk); D.Sc., Prof. *Erofeev V.I.* (Tomsk); D.Sc., Prof. *Zalesov S.V.* (Ekaterinburg); D.Sc., Docent *Zakharchenko A.V.* (Tomsk); D.Sc., Prof. *Zvolinsky V.P.* (Volgograd); D.Sc., Prof. *Ivashkevich A.N.* (Moscow); D.Sc., Docent *Kavtsevich N.N.* (Murmansk); D.Sc., Prof. *Kalyakin S.A.* (Donetsk); D.Sc., Prof. *Karaev M.K.* (Makhachkala); D.Sc., Prof. *Kashaev A.A.* (Irkutsk); D.Sc., Prof. *Kobrunov A.I.* (Ukhta); D.Sc., Docent *Kopylov I.S.* (Perm); D.Sc., Prof. *Kostitsyn V.I.* (Perm); D.Sc., Prof. *Kostylev P.I.* (Zernograd); D.Sc., Prof. *Kosyakova I.V.* (Samara); D.Sc., *Kotsareva N.V.* (Belgorod); D.Sc., Docent *Kuz'yakov O.N.* (Tyumen); D.Sc., Prof. *Kucherenko I.V.* (Tomsk); D.Sc., Prof. *Larionov M.V.* (Saratov); D.Sc., Prof. *Lebedev V.I.* (Kyzyl); D.Sc., Prof. *Lerer A.M.* (Rostov-on-Don); D.Sc., Prof. *Lugovskoy A.M.* (Moscow); D.Sc., Prof. *Melnikov A.I.* (Irkutsk); D.Sc., Prof. *Musaev V.K.* (Moscow); D.Sc., Docent *Nehorosheva A.V.* (Khanty-Mansiysk); D.Sc. *Nikitin S.N.* (Ulyanovsk); D.Sc. *Okazova Z.P.* (Vladikavkaz); D.Sc., Prof. *Partoev K.* (Dushanbe); D.Sc., Prof. *Petelko A.I.* (Mtsensk); D.Sc., Prof. *Petrov M.N.* (Krasnoyarsk); D.Sc., Prof. *Pirumyan G.P.* (Yerevan); D.Sc., Prof. *Proezdov P.N.* (Saratov); D.Sc., Prof. *Sakiev K.S.* (Bishkek); D.Sc. *Sibikeev S.N.* (Saratov); D.Sc., Docent *Sokolskaya O.B.* (Saratov); D.Sc., Prof. *Stepanov V.V.* (Saint Petersburg); D.Sc., Prof. *Tarassenko A.A.* (Tyumen); D.Sc. *Teplukhin V.K.* (Oktyabr'skiy); D.Sc., Prof. *Titov V.A.* (Moscow); D.Sc., Prof. *Titov V.N.* (Saratov); D.Sc., Prof. *Tikhanovsky A.N.* (Salekhard); D.Sc., Prof. *Trofimenko S.V.* (Neryungri); D.Sc., Prof. *Ulrich E.V.* (Kemerovo); D.Sc., Prof. *Choduraev T.M.* (Bishkek); D.Sc., Prof. *Shamshiev B.N.* (Osh); D.Sc., Prof. *Shantarin V.D.* (Tyumen); D.Sc., Prof. *Shatov A.A.* (Ufa); D.Sc., Prof. *Shirapov D.Sh.* (Ulan-Ude); D.Sc., Prof. *Shishelova T.I.* (Irkutsk); D.Sc., Prof. *Shugunov L.Zh.* (Nalchik); D.Sc., Prof. *Yurgenson G.A.* (Chita); D.Sc., Prof. *Yakovenko N.V.* (Voronezh); D.Sc., Prof. *Yamaletdinova K.Sh.* (Chelyabinsk)

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) = 0,775

Impact-factor RISQ (five-year) = 0,368

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, st. Lermontov, 3
Printing house	LLC SPC Academy of Natural History 410035, Saratov, st. Mamontova, 5
E-mail	edition@rae.ru
Signed for print	30.07.2025
Format	60x90 1/8
Circulation	1000 copies
Telephone	+7 (499) 705-72-30
Number issue date	29.08.2025
Conditionally printed sheets	10,25
Order	YCE 2025/7

Distribution at a free price

Subscription index in the Russian Post electronic catalog: P7816

© LLC PH Academy of Natural History

## СОДЕРЖАНИЕ

### Географические науки (1.6.8, 1.6.12, 1.6.13, 1.6.21)

#### СТАТЬИ

- АНАЛИЗ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПАРАМЕТРОВ КАРБОНАТНОЙ СИСТЕМЫ  
В ЗОНЕ СМЕШЕНИЯ РЕЧНЫХ, ЗАЛИВНЫХ И МОРСКИХ ВОД  
(НА ПРИМЕРЕ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ)  
*Бирюкова А.Д., Муратова А.А., Ульянова М.О.* .....8
- ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ АБИОТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ  
НА ДИНАМИКУ РАЗМЕРНОГО РЯДА И БИОМАССЫ  
ПОПУЛЯЦИИ ИНВАЗИВНОГО МОЛЛЮСКА *ANADARA*  
*KAGOSHIMENSIS* (ТОКУНАГА, 1906) В АЗОВСКОМ МОРЕ  
*Волощук М.С., Картамышева Т.Б., Шевцова Е.А.,  
Жукова С.В., Подмарева Т.И., Елфимова Н.С.* .....20
- ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЛАНДШАФТОВ БАССЕЙНА  
РЕКИ ПЕЛЕДУЙ В ЗОНЕ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ТАЛАКАНСКОГО  
НЕФТЕГАЗОДОБЫВАЮЩЕГО КОМПЛЕКСА  
*Николаева Н.А., Пинигин Д.Д.* .....28
- ВЛИЯНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА КАЧЕСТВО ЖИЗНИ  
НАСЕЛЕНИЯ В МУНИЦИПАЛИТЕТАХ НОВГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ  
*Юзбеков М.А., Юзбеков А.К.* .....34

#### НАУЧНЫЙ ОБЗОР

- НОВЕЙШИЕ КОНЦЕПЦИИ В ГЕОГРАФИИ И ТЕРРИТОРИАЛЬНОМ  
ПЛАНИРОВАНИИ ТРАНСПОРТА (НА ПРИМЕРЕ ЗАРУБЕЖНЫХ  
КОНЦЕПЦИЙ РАЗВИТИЯ ТРАНСПОРТА) И ВОЗМОЖНОСТЬ  
ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В РОССИИ  
*Волкова И.Н., Крылов П.М., Семин И.А., Фоломейкина Л.Н.* .....43

### 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

- РАЗРАБОТКА СПОСОБА ПОЛУЧЕНИЯ ПОДЩЕЛАЧИВАЮЩЕГО  
РЕАГЕНТА ДЛЯ ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ ЖИДКИХ СТОКОВ  
СВИНОВОДЧЕСКИХ ФЕРМ С ПОЛУЧЕНИЕМ ПРОДУКТА  
С ВЫСОКОЙ АГРОМЕЛИОРАТИВНОЙ ЦЕННОСТЬЮ  
*Монастырский Д.И., Куликова М.А., Шабельская Н.П.,  
Гайдукова Ю.А., Вяльцев А.В., Сулима С.И.* .....51

---

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

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ТОЧНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ  
НА НЕПРЕРЫВНО ДЕЙСТВУЮЩИХ ОПОРНЫХ СТАНЦИЯХ  
GNSS В РЕСПУБЛИКЕ ЛИВАН

*Акл М.Н., Половнев О.В., Насереддин Х.Х.* .....57

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО  
СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ НАБЕРЕЖНОЙ ПРАВОГО БЕРЕГА  
РЕКИ НЕВЫ В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ

*Лебедева Я.А., Алексеев И.В., Котюков П.В., Ланге И.Ю., Уксусова Е.С.* .....63

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

ИССЛЕДОВАНИЕ КОРНЕВОЙ СИСТЕМЫ ЛЕСНЫХ КУЛЬТУР ЕЛИ  
ЕВРОПЕЙСКОЙ В СЛОЖНЫХ СУБОРЯХ НА ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЕ

*Прутской А.В.* .....71

## CONTENTS

### Geographical sciences (1.6.8, 1.6.12, 1.6.13, 1.6.21)

#### ARTICLES

- ANALYSIS OF THE VARIABILITY OF CARBONATE SYSTEM  
PARAMETERS IN THE MIXING ZONE OF RIVER, FLOOD AND  
SEA WATERS (ON THE EXAMPLE OF THE SOUTHEASTERN  
PART OF THE BALTIC SEA)  
*Biryukova A.D., Muratova A.A., Ulyanova M.O.* .....8
- ASSESSMENT OF THE IMPACT OF ABIOTIC FACTORS  
ON THE DYNAMICS OF SIZE RANGE AND BIOMASS  
OF THE INVASIVE MOLLUSK *ANADARA KAGOSHIMENSIS*  
(TOKUNAGA, 1906) IN THE SEA OF AZOV  
*Voloschuk M.S., Kartamysheva T.B., Shevtsova E.A.,  
Zhukova S.V., Podmareva T.I., Elfimova N.S.* .....20
- ENVIRONMENTAL ASSESSMENT OF LANDSCAPES  
OF THE PELEDUY RIVER BASIN IN THE AREA OF ACTIVITIES  
OF THE TALAKAN OIL AND GAS PRODUCTION COMPLEX  
*Nikolaeva N.A., Pinigin D.D.* .....28
- INFLUENCE OF ENVIRONMENTAL CONDITIONS  
ON THE QUALITY OF LIFE OF THE POPULATION  
IN THE MUNICIPALITIES OF THE NOVGOROD REGION  
*Yuzbekov M.A., Yuzbekov A.K.* .....34

#### REVIEW

- THE LATEST CONCEPTS IN GEOGRAPHY AND TERRITORIAL  
PLANNING OF TRANSPORT (USING THE EXAMPLE  
OF FOREIGN CONCEPTS OF TRANSPORT DEVELOPMENT)  
AND THE POSSIBILITY OF THEIR APPLICATION IN RUSSIA  
*Volkova I.N., Krylov P.M., Semina I.A., Folomeykina L.N.* .....43

### 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

- DEVELOPMENT OF A METHOD FOR OBTAINING  
AN ALKALIZING REAGENT FOR FRACTIONATION  
OF LIQUID EFFLUENTS FROM PIG FARMS TO PRODUCE  
A PRODUCT WITH HIGH AGRO-RECLAMATION VALUE  
*Monastyrskiy D.I., Kulikova M.A., Shabelskaya N.P.,  
Gaydukova Yu.A., Vyaltsev A.V., Sulima S.I.* .....51

---

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

APPLICATION OF PRECISE POSITIONING METHOD  
ON CONTINUOUSLY OPERATING GNSS REFERENCE  
STATIONS IN THE REPUBLIC OF LEBANON

*Akl M.N., Polovnev O.V., Nasereddin H.H.* .....57

ENGINEERING-GEOLOGICAL ANALYSIS OF THE CURRENT  
STATE OF THE EMBANKMENT STRUCTURES OF THE RIGHT  
BANK OF THE NEVA RIVER IN SAINT PETERSBURG

*Lebedeva Ya.A., Alekseev I.V., Kotyukov P.V., Lange I.Yu., Uksusova E.S.* .....63

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

STUDY OF THE ROOT SYSTEM OF FOREST CROPS OF EUROPEAN  
SPRUCE IN COMPLEX SUBSORS ON PODZOLIC SOIL

*Prutskoy A.V.* .....71

## СТАТЬИ

УДК 504.423(261.24)

DOI

**АНАЛИЗ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПАРАМЕТРОВ КАРБОНАТНОЙ СИСТЕМЫ  
В ЗОНЕ СМЕШЕНИЯ РЕЧНЫХ, ЗАЛИВНЫХ И МОРСКИХ ВОД  
(НА ПРИМЕРЕ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ)****<sup>1</sup>Бирюкова А.Д., <sup>1,2</sup>Муратова А.А., <sup>2</sup>Ульянова М.О.**<sup>1</sup>ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта», Калининград;<sup>2</sup>ФГБУН Институт океанологии имени П.П. Ширшова Российской академии наук, Москва,  
e-mail: marioches@mail.ru

В ходе исследования была изучена сезонная изменчивость параметров карбонатной системы в зоне смешения речных, заливных и морских вод (р. Преголя, Калининградский залив и прибрежная зона юго-восточной части Балтийского моря) и на фоновой точке в открытом море в 2024 г. Актуальность работы обусловлена важностью понимания буферных механизмов морской воды в условиях речного стока. Изучаемые параметры карбонатной системы тесно связаны с гидрологическими и биогеохимическими процессами и играют ключевую роль в поддержании кислотно-основного баланса вод. Целью исследования являлся анализ изменчивости параметров карбонатной системы в зоне смешения речных, заливных и морских вод (на примере юго-восточной части Балтийского моря в течение 2024 г. Отбор проб воды выполнялся батометром Нискина, температура и соленость воды измерялись мультипараметрическими зондами, определение pH и щелочности выполнялось потенциометрическим титрованием с последующей коррекцией данных в программе CO2SYS. В результате исследования были выявлены значительные сезонные колебания температуры, солености, pH и щелочности. Установлена обратная связь между соленостью и общей щелочностью: речной сток существенно повышает общую щелочность в устьевой зоне, особенно в летний период, и формирует более выраженные пространственные градиенты гидрохимических параметров по сравнению с открытым морем. Полученные данные подчеркивают роль прибрежных эстуарных систем в углеродном балансе полузамкнутых морских бассейнов.

**Ключевые слова:** pH, щелочность, углеродный цикл, юго-восточная часть Балтийского моря, система река – море

*Экспедиции, анализ и интерпретация гидрофизических параметров и pH выполнены в рамках госзадания ИО РАН (тема № FMWE-2024-0025). Данные о распределении значений щелочности для последующего расчета потоков углекислого газа получены при финансовой поддержке проекта ВПП ГЗ по программе консорциума «ОКЕАН: МОНИТОРИНГ И АДАПТАЦИЯ».*

**ANALYSIS OF THE VARIABILITY OF CARBONATE SYSTEM PARAMETERS  
IN THE MIXING ZONE OF RIVER, FLOOD AND SEA WATERS  
(ON THE EXAMPLE OF THE SOUTHEASTERN PART OF THE BALTIC SEA)****<sup>1</sup>Biryukova A.D., <sup>1,2</sup>Muratova A.A., <sup>2</sup>Ulyanova M.O.**<sup>1</sup>Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad;<sup>2</sup>Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences, Moscow,  
e-mail: marioches@mail.ru

The study examined the seasonal variability of the carbonate system parameters in the mixing zone of river, lagoon and sea waters (the Pregolya River, the Kaliningrad Lagoon and the coastal zone of the south-eastern Baltic Sea) and at a background point in the open sea in 2024. The significance of this research lies in its crucial role in enhancing our understanding of the buffering mechanisms exhibited by seawater under conditions of river runoff. The parameters of the carbonate system that were the focus of this study are closely related to hydrological and biogeochemical processes, and play a key role in maintaining the acid-base balance of waters. The objective of the study was to analyse the variability of carbonate system parameters in the mixing zone of river, estuary and sea waters (using the example of the south-eastern part of the Baltic Sea during 2024). Water samples were collected using a Niskin bottle, and the water temperature and salinity were measured using multiparameter probes. The pH and alkalinity were determined using potentiometric titration, with subsequent data correction in the CO2SYS software. The findings revealed significant seasonal variations in temperature, salinity, pH and alkalinity. An inverse relationship between salinity and total alkalinity was established: river runoff significantly increases the total alkalinity in the estuarine zone, especially during summer months, and forms more pronounced spatial gradients of hydrochemical parameters compared to the open sea. The data obtained underline the part played by coastal estuarine systems in the carbon balance of semi-enclosed marine basins.

**Keywords:** pH, alkalinity, carbon cycle, south-eastern Baltic Sea, river – sea system

*The expeditions, analysis and interpretation of hydrophysical parameters and pH were carried out within the framework of the state assignment of the IO RAS (topic No. FMWE-2024-0025). Data on the distribution of alkalinity values for the subsequent calculation of carbon dioxide fluxes were obtained with the financial support of the Unified National System for Monitoring Climate-Active Substances project under the program of the consortium «OCEAN: MONITORING AND ADAPTATION».*

### Введение

Карбонатная система – комплекс неорганических соединений углерода, связанных физико-химическими равновесиями. Это ключевая равновесная система в море, стабилизируемая содержанием  $\text{CO}_2$  в атмосфере на границе с воздухом и низкой растворимостью карбоната кальция (кальцит, арагонит и др.) на границе с донными осадками. Буферная функция системы поддерживает кислотно-основной баланс морской воды, необходимый для жизнедеятельности организмов. Сложность карбонатной системы вызвана совокупностью взаимосвязанных процессов. Полярность молекул воды создает условия для электрон-донорно-акцепторных взаимодействий между ее компонентами. Равновесие в системе зависит от pH, солёности, температуры, растворимости соединений и «солевого эффекта», динамики вод [1, с. 60].

Щелочность характеризует способность морской воды нейтрализовать добавляемую к ней сильную кислоту благодаря присутствию в растворе анионов слабых кислот. Основной вклад в общую щелочность вносят карбонатная и бикарбонатная составляющие. Пределы изменчивости общей щелочности в открытом океане достаточно узки (2200–2500 мкмоль/кг). Общая щелочность увеличивается с повышением  $\text{CO}_2$ , солёности и с уменьшением pH, поскольку гидрокарбонатные и боратные ионы относятся к компонентам основного солевого состава: биологическое удаление или растворение карбоната кальция, поступление материковых вод и иное, чем в океане, соотношение главных ионов, образование и таяние льдов. Щелочностью контролируется способность морской воды сохранять  $\text{CO}_2$ . В геологическом прошлом обратные связи щелочности океана играли важную роль в регулировании климата Земли. Периоды интенсивного потепления привели к усилению выветривания, тем самым высвобождая дополнительную щелочность в океан, которая задерживает атмосферный  $\text{CO}_2$  и противодействует потеплению. На сегодняшний день существует идея технологии преднамеренного повышения щелочности океана (ocean alkalinity enhancement), которая направлена на увеличение щелочности поверхностных вод для интенсивной секвестрации  $\text{CO}_2$  путем добавления минералов, электрохимии и известкования поверхностных вод [2, с. 181]. Антропогенная щелочность может значительно снижать образование естественной

щелочности: антропогенная щелочность увеличивает насыщение карбонатом кальция, что снижает растворение карбоната кальция из песка – природного источника щелочности [3].

Метод по высвобождению кальцита вблизи донных отложений и использование эффекта повышенной растворимости минералов в поровой воде для более эффективного растворения может оказаться перспективным в Балтийском море. Балтийское море считается потенциальным местом применения этого метода, поскольку, в отличие от других морей, оно частично недонасыщено кальцитом даже на небольших глубинах [4]. Исследования показывают, что накопление общей щелочности и поглощение  $\text{CO}_2$  атмосферы демонстрируют схожие тенденции по всему Балтийскому морю, хотя и со значительными различиями в величине: воды с низкой солёностью, демонстрируют более высокую эффективность секвестрации  $\text{CO}_2$  на каждый добавленный моль  $\text{Ca}^{2+}$  по сравнению с водами высокой солёности [5].

Эстуарии представляют собой переходные области взаимодействия между различными геосферами, являясь связующим звеном между континентальными, океаническими и атмосферными системами. Речная вода, как правило, имеет более низкий pH, чем морская, из-за присутствия растворенного органического вещества и других кислых соединений. При смешении с морской водой речной сток способен вызывать локальное снижение pH, особенно заметное в эстуариях и прибрежных экосистемах. Водотоки, дренирующие карбонатные породы, становятся проводниками неорганического углерода, усиливая насыщение воды карбонат-ионами и стимулируя процессы карбонатной седиментации. Дисбаланс распределения общей щелочности в современном океане между речным поступлением растворенного неорганического углерода и морским захоронением карбонатов не может быть решен путем поступления щелочи через подземные грунтовые воды, ее образования в океане в результате анаэробной минерализации или подводного выветривания. Однако баланса можно достичь, если учесть поступление щелочи в океан через речной сток твердых частиц неорганического углерода [6].

На гидрохимические условия Балтийского моря определяющее влияние оказывают следующие факторы: затрудненный водообмен с Атлантическим океаном, зна-

чительный материковый сток, двухслойная вертикальная структура вод. Балтийские воды близки по ионному составу к океанским водам, однако отличаются повышенным относительным содержанием ионов натрия [7]. Это различие уменьшается от берегов к центральным частям моря, а также с увеличением глубины. В среднем в Балтийском море щелочность превышает океаническую вдвое. Гидрохимический режим рек коррелирует с минеральным составом отложений водосборных бассейнов: маломинерализованные водотоки севера, дренирующие бедные карбонатами регионы, контрастируют с высокощелочными системами юго-востока Балтики. Максимальные значения щелочности фиксируются в эстуариях р. Луга, Вента, Даугава и Висла, тогда как Нева, формирующая сток восточной части Финского залива, демонстрирует минимальные показатели [7]. На динамику карбонатной системы существенно влияют биогеохимические циклы, включая синтез органических соединений и реминерализацию, что связано с эвтрофикацией и масштабным поступлением веществ через речной сток [8].

Калининградский залив, являясь частью Вислинского залива, представляет собой опресненный морской водоем, расположенный на юго-восточном побережье Балтийского моря, является приемным водоемом для р. Преголи. Калининградский залив представляет собой северный сегмент эстуарной лагуны, где формируется зона смешения вод с промежуточной соленостью (6–7 промилле) между пресными речными и солоноватыми балтийскими водами [9]. В северной части залива находится Калининградский морской судоходный канал, который начинается у устья Преголи и, по сути, является продолжением русла реки. В канале интенсивно происходит смешение речных и заливных вод, разделенных градиентными зонами [10].

Для Преголи характерно неравномерное распределение стока в течение года. В зимний период наблюдается повышенная водность, обусловленная регулярными паводками. Летом уровни воды отличаются нестабильностью, а осенняя межень также неустойчива и часто сопровождается повышенной водностью. Иногда зимние паводки по объему воды превосходят весеннее половодье. Пик мощности зимних паводков обычно приходится на февраль [11].

**Цель исследования** – анализ изменчивости параметров карбонатной системы

в зоне смешения речных, заливных и морских вод (на примере юго-восточной части Балтийского моря в течение 2024 г.

### Материалы и методы исследования

Отбор проб воды выполнялся в феврале, июне и ноябре 2024 г. (рис. 1). Пробы отбирались на двух горизонтах – поверхностном (0–1 м) и придонном (8–10 м). Отбор проб в открытом море на фоновой точке (ФТ, 55.32 с.ш., 20.60 в.д.) производился на трех горизонтах: поверхностном (0–1 м), промежуточном (10 м) и придонном (28 м) ежемесячно в течение года (17.01, 14.02, 27.03, 24.04, 22.05, 19.06, 25.09, 13.11, 04.12).

Отбор проб воды производился с помощью батометра Нискина объемом 10 л. Гидрофизические параметры измерялись мультипараметрическими зондами: в феврале и июне SAIV SD208, в ноябре – CTD48Mc Sea&Sun Technology, на ФТ – CastAway.

Измерение водородного показателя проводилось портативным рН-метром HI 991003 (Hanna Instruments). Диапазон измерений: от -2 до 16 ед. рН, температуры: от -5 до 105 °С, пределы допускаемых значений абсолютной погрешности ±0,02 ед. рН и ±0,5 °С соответственно. Калибровка прибора производилась автоматически с использованием буферных растворов Hanna Instruments: 7,01 и 10,01. Определение общей щелочности производилось методом прямого титрования по методу Бруевича с потенциометрическим определением точки конца титрования [12, с. 81–85]. Титрование выполнялось слабым раствором соляной кислоты (0,02N) при непрерывной продувке очищенным от CO<sub>2</sub> воздухом до достижения величины рН 5,4–5,5 на автоматическом титраторе SI Analytics Titroline 5000. Расчет элементов карбонатной системы и коррективки измеренных значений с учетом поправок выполнены в программе CO2SYS. Поскольку величина рН восприимчива к температуре и гидростатическому давлению, чтобы получить достоверные результаты, необходимо вводить поправки, которые позволяют привести значения к *in situ*. Визуализация результатов проводилась с помощью программы QGIS и OceanDataView.

Данные по среднесуточному количеству осадков взяты по пункту наблюдения в пос. Низовье в 23 км от устья Преголи (<https://tr5.ru>). Данные по уровню воды в Преголе на гидрологическом посту на музейном судне «Витязь» взяты из фондовых материалов Атлантического отделения Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН.

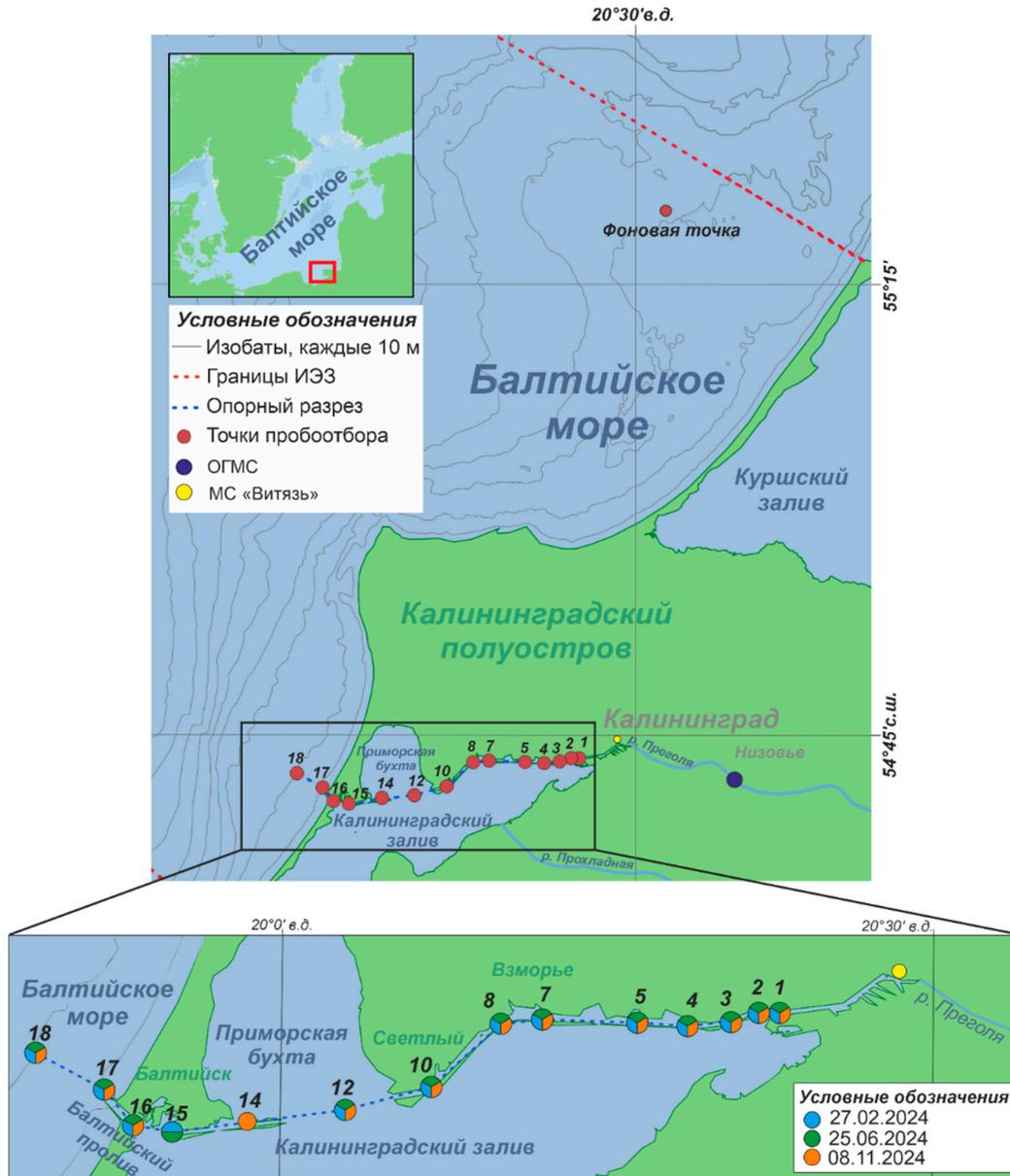


Рис. 1. Положение точек отбора проб воды в 2024 г., МС «Витязь» и ОГМС Калининград – Низовье  
 Источник: составлено авторами по результатам данного исследования

**Результаты исследования и их обсуждение**

27.02.2024

В конце февраля максимальная соленость (7,2 псс) была зафиксирована в придонном слое морской части профиля, минимальное значение (0,1 псс) отмечено на поверхности у устья реки (рис. 2). Температурный максимум (6,1°C) зарегистрирован на поверхности у устья реки, а минимум (3,5°C) – в придонном слое морской зоны. Значения pH варьировали от 6,93 в зоне мак-

симального речного влияния до 8,52 в придонном слое морской зоны. Общая щелочность достигала пиковых значений (3032 мкмоль/кг) в поверхностном слое у устья реки, а наименьшие концентрации (1712 мкмоль/кг) были характерны для морской зоны. Распределение параметров отражало обратную корреляцию между pH и щелочностью. Соленость и температура также демонстрировали связь с зональностью: рост солености сопровождался снижением температуры, особенно выраженным в придонных слоях морской зоны.

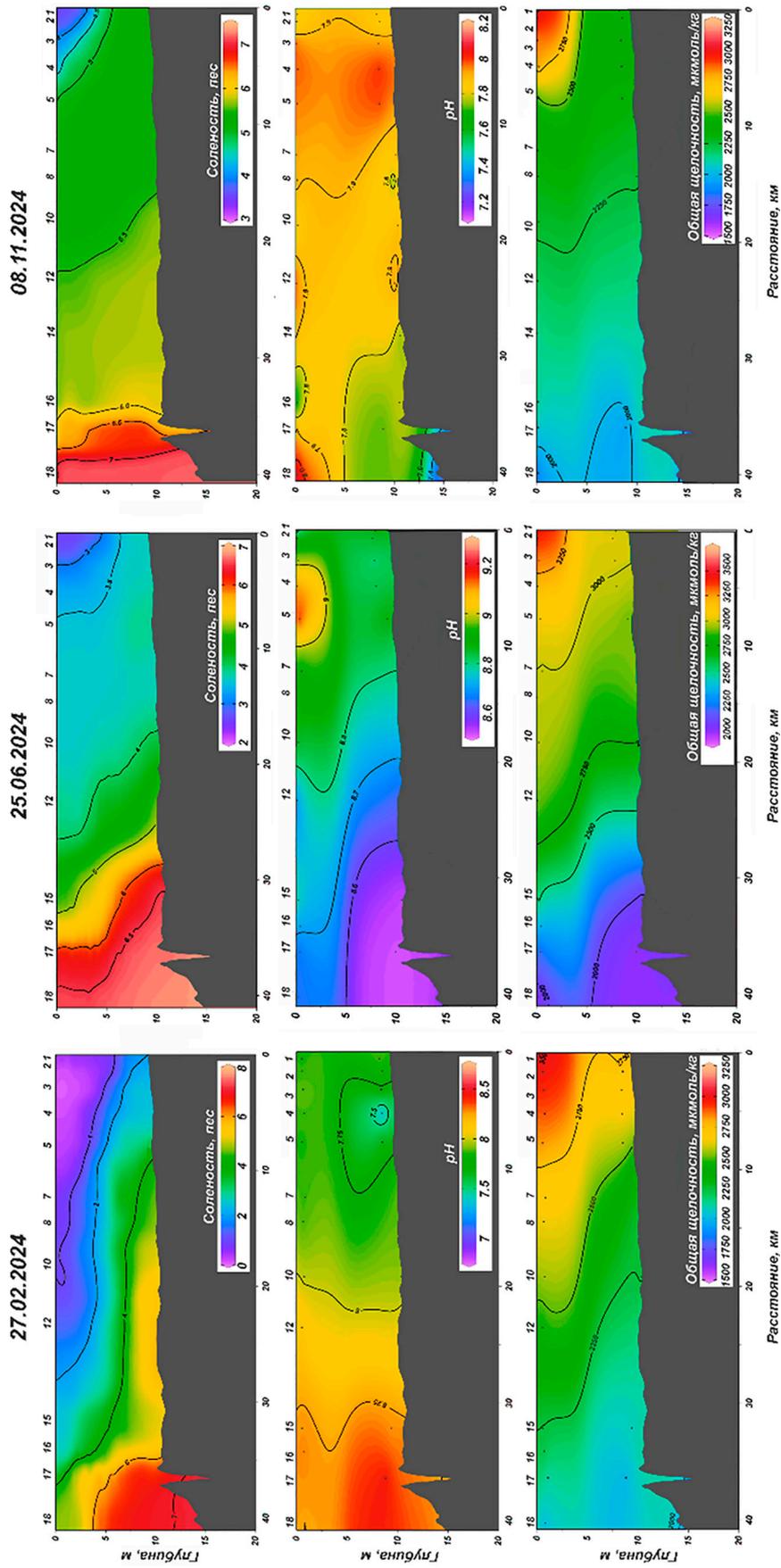


Рис. 2. Распределение температуры, солёности, общей щёлочности и pH в зоне смешения вод р. Преголи с водами юго-восточной части Балтийского моря в 2024 г.  
 Источник: составлено авторами по результатам данного исследования

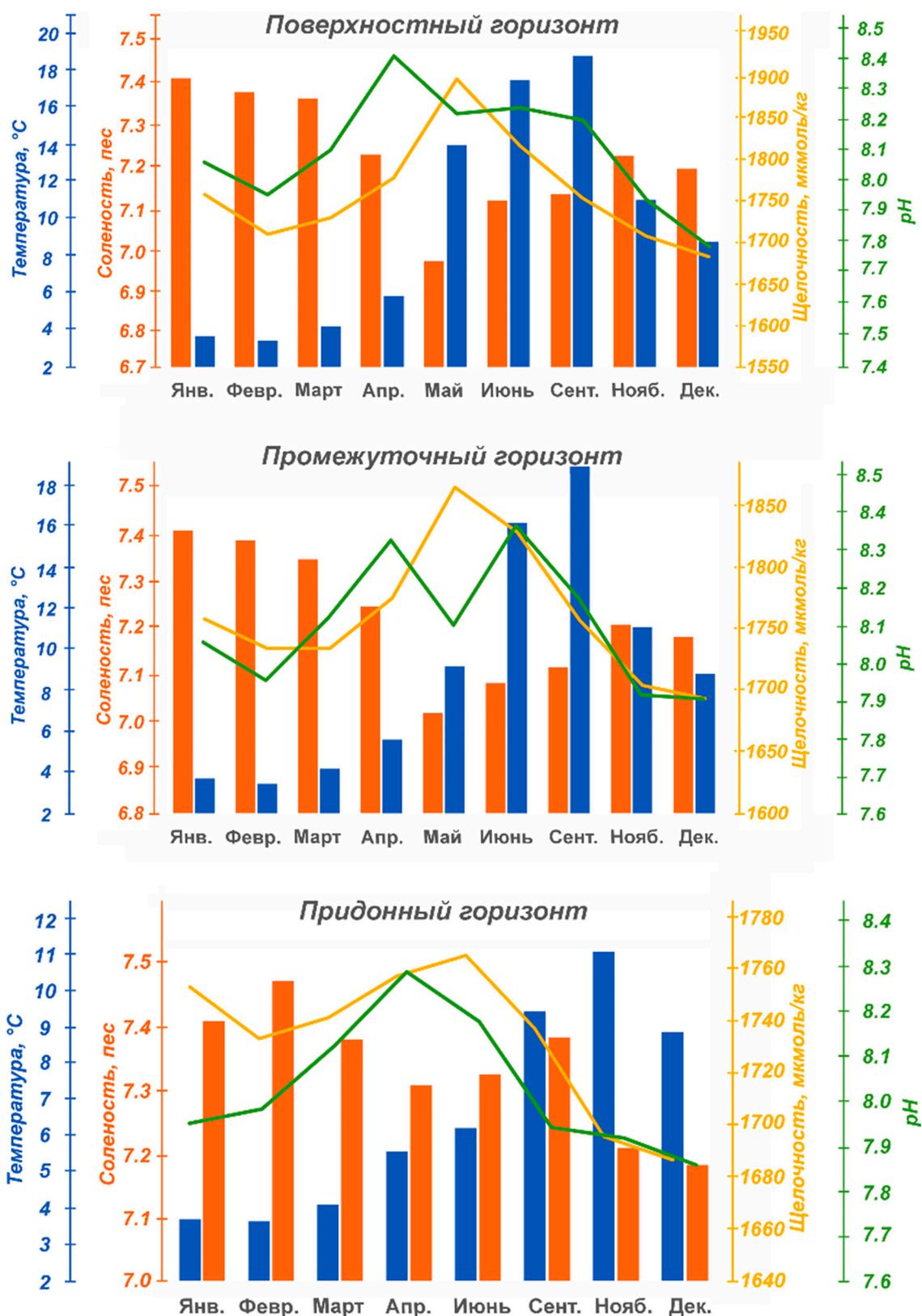


Рис. 3. Распределение температуры, солености, щелочности и pH в поверхностном (0–1 м), промежуточном (10 м) и придонном (28 м) горизонтах ФТ в 2024 г. Источник: составлено авторами по результатам данного исследования

25.06.2024

В конце июня максимальная соленость (6,9 пс) снова зафиксирована в придонном горизонте морской части профиля, а минимальная (2,5 пс) – в поверхностном слое у устья реки (рис. 2). Наибольшая температура воды (23,8 °С) отмечена на поверхности у устья, а самая низкая (16,9 °С) – в прибрежной зоне моря у дна. Значения рН варьировали от 8,52 (придонный горизонт морской зоны вблизи Балтийского пролива) до 9,26 (поверхностные воды вблизи п. Взморье). То есть максимальное значение рН было приурочено не к устью реки, а находилось на расстоянии около 7 км от него. Общая щелочность достигла максимума (3510 мкмоль/кг) в устьевой зоне и минимума (1801 мкмоль/кг) в морской зоне у дна. Распределение параметров демонстрировало обратную связь между рН и щелочностью, пиковые значения щелочности соответствовали приустьевому району с низкой соленостью, а минимальные – зонам с высокой соленостью. При этом соленость и температура также коррелировали: рост солености сопровождался снижением температуры, особенно выраженным в придонных горизонтах морской части разреза.

08.11.2024

В начале ноября наибольшая соленость (7,2 пс) зафиксирована в прибрежной зоне моря у дна, а минимальная (3,2 пс) – в поверхностном слое у устья (рис. 2). По температуре район был сравнительно однороден: максимум (11,4 °С) отмечен в самой глубокой зоне профиля, а минимум (7,4 °С) – так же у дна, но в центральной части профиля (вблизи п. Взморье). Значения рН варьировали от 7,20 (в поверхностном слое Балтийского пролива) до 8,18 (на поверхности моря). Общая щелочность достигала максимума (3052 мкмоль/кг) в поверхностном слое канала у устья реки и минимума (1718 мкмоль/кг) – в придонном горизонте морской зоны. Распределение параметров демонстрировало обратную связь. Общая щелочность снижалась при росте солености и температуры, а рН уменьшалась с удалением от устья реки.

#### *Фоновая точка (открытое море)*

В поверхностном слое моря (0–1 м) в течение года наблюдались значительные колебания температуры воды в диапазоне от 3,4 °С (февраль) до 18,9 °С (сентябрь) (рис. 3). Соленость менялась незначительно, но некоторая сезонная динамика прослеживалась: минимальное значение 7,0 пс зафиксировано в мае, максимальное 7,4 пс –

в январе. Кислотно-щелочной баланс (рН) и общая щелочность характеризовались сопряженной изменчивостью: значения рН варьировали от 7,79 (декабрь) до 8,42 (апрель), тогда как общая щелочность изменялась в пределах 1682–1896 мкмоль/кг с минимумом в декабре и максимумом в мае.

В промежуточном горизонте (10 м) показатели температуры и солености были схожи с поверхностным горизонтом. Температурный режим характеризовался от 3,4 °С (февраль) до 18,9 °С (сентябрь) (рис. 3). Соленость изменялась в пределах 7,0–7,4 пс (май и январь соответственно). Общая щелочность и рН также были пропорциональны друг другу, рН изменялся от 7,91 до 8,39 с минимумом в декабре и максимумом в июне, тогда как значения общей щелочности изменялись от 1693 в декабре до 1864 мкмоль/кг в мае.

Температурный режим в придонном слое (28 м) демонстрировал сходную с вышележащими слоями сезонную динамику. Температура изменялась от 3,6 °С (февраль) до 11,1 °С (ноябрь). Соленость придонного горизонта отличалась от вышележащих слоев и изменялась в пределах 7,2–7,5 пс (декабрь и февраль соответственно). Значения рН варьировали от 7,85 до 8,29 (декабрь и апрель соответственно). Пропорционально изменению рН происходило изменение общей щелочности с минимумом в декабре (1686 мкмоль/кг) и максимумом в июне (1765 мкмоль/кг) (рис. 3).

#### *Зона смешения*

В конце февраля зона смешения речных, заливных и морских вод была более стратифицирована по солености, чем летом и осенью. Для февраля и марта в регионе характерно половодье [10]. Для 2024 г. данных о расходе р. Преголи в открытом доступе нет. По количеству осадков, выпавших в январе и феврале в Калининградской области (150–170 и 160–200 мм для г. Черняховск в 90 км от устья Преголи и пос. Низовье в 23 км от устья соответственно (рис. 4)), можно предположить, что во время проведения исследований в конце февраля сток с водосборной площади был максимальным. В середине февраля также зафиксирован годовой максимум уровня воды в Преголе в черте г. Калининграда (пост на музейном судне «Витязь»), что свидетельствует о половодье в этот период. Это привело к тому, что слой распресненных вод продвинулся по устьевой области в сторону моря вплоть до Приморской бухты, то есть на 20–25 км от устья реки (рис. 2).

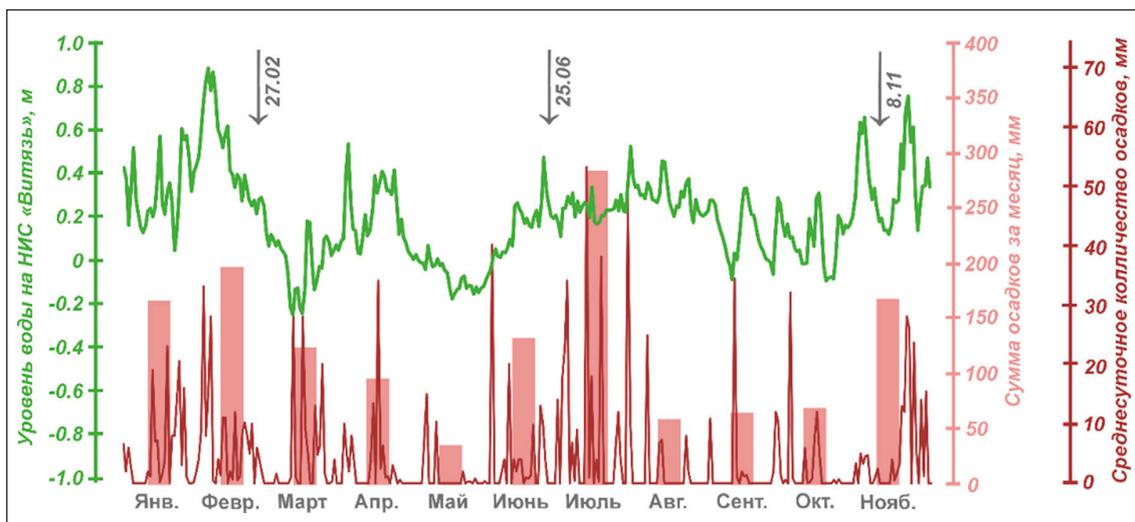


Рис. 4. Среднемесячное и среднесуточное количество осадков в пос. Низовье и ежедневный ход уровня воды на МС «Витязь» в период с января по ноябрь 2024 г. Стрелками отмечены даты проведения экспедиционных исследований  
 Источник: составлено авторами по результатам данного исследования

Соленость в зоне смешения возрастала от весны к осени, что связано с уменьшением речного стока в теплый период (рис. 4). В открытом море динамика солености была незначительной (от 7,0 до 7,4 пс), что отражает стабильное перемешивание и отсутствие прямого влияния пресных вод. Температура воды следовала сезонному ходу. Максимальная температура в эстуарии (23,8 °С) зафиксирована у устья за счет небольшой глубины и слабого водообмена, в открытом море максимальные значения зарегистрированы в сентябре (до 18,9 °С). Минимум в феврале связан с зимним охлаждением, причем сильнее это проявляется в морской зоне, где глубины больше и процессы теплопереноса замедлены.

Показатель рН в северной части Калининградского залива отличался высокой изменчивостью. В зимний период наблюдалось увеличение рН от устья к морю (6,93–8,52), летом – в устьевой зоне значения рН достигали 9,26, превышая морские показатели. Такая динамика соотносится с увеличением интенсивности развития фитопланктона, которое происходит в заливе в летний период года [13]. В целом для Калининградского залива рН исследуемых проб воды демонстрировали рост с начала года, достигнув максимума в летний период (в среднем 8,47), затем наблюдалось снижение рН до 7,77 в зимний период [14]. Таким образом, проведенное в 2024 г. в зоне смешения исследование показало большую ва-

риабельность водородного показателя, чем непосредственно в акватории залива, как во времени, так и в пространстве.

Калининградский залив является высокопродуктивным водоемом из-за постоянного поступления биогенных веществ от интенсивной сельскохозяйственной деятельности и коммунально-бытовых и промышленных стоков в водосборном бассейне. Значения рН в позднезимний период (февраль) увеличивались по мере продвижения к морю. Это объясняется тем, что пресная вода, хотя и более насыщена кислородом, в холодный сезон имеет пониженный рН из-за минимальной биологической активности [14, 15]. В то же время морская вода, обладая высокой буферной емкостью, сохраняет более стабильный и повышенный уровень рН. В более теплые, биологически активные периоды в канале и заливе складываются оптимальные условия для развития фито- и зоопланктона, в осенний период в солоноватоводной части разреза происходит снижение биомассы, а в морской части за счет осеннего «цветения» биомасса фитопланктона может даже увеличиваться [16]. Кроме биологических процессов на низкую величину рН может влиять поступление сточных (иногда неочищенных) вод в районе устья реки, которое связано с интенсивными осадками и половодьем. Летом (июнь) в устьевой зоне рН становится выше, чем в морской. Это связано с активным фотосинтезом фитопланктона у устья [13, 14],

который поглощает растворенный  $\text{CO}_2$ , что приводит к подщелачиванию воды. В морской же зоне, особенно в придонном слое, возможно локальное закисление из-за разложения органического вещества. Поздней осенью (ноябрь) распределение pH становится более однородным. Это обусловлено интенсивным ветровым и конвективным перемешиванием воды, а также снижением биологической продуктивности [13], что уменьшает контраст между речными и морскими водами.

Наблюдаемое распределение общей щелочности в зоне смешения в 2024 г. имеет ряд особенностей. Была зафиксирована обратная зависимость – уменьшение ще-

лочности при росте солености, коэффициент детерминации изменяется от 0,70 осенью до 0,99 летом (рис. 5). Для сравнения, в Щецинском заливе, где условия схожи с районом исследования, линейная зависимость наблюдалась, наоборот, в холодный период (ноябрь), в мае же ожидаемая линейная зависимость отсутствовала [17]. Основной причиной такого распределения служит значительный вклад речного стока, обогащенного растворенными веществами. С температурой у щелочности выявлена менее значительная связь: коэффициенты детерминации от 0,36 до 0,70, что говорит о меньшем влиянии температуры на изменение общей щелочности, чем солености (рис. 5).

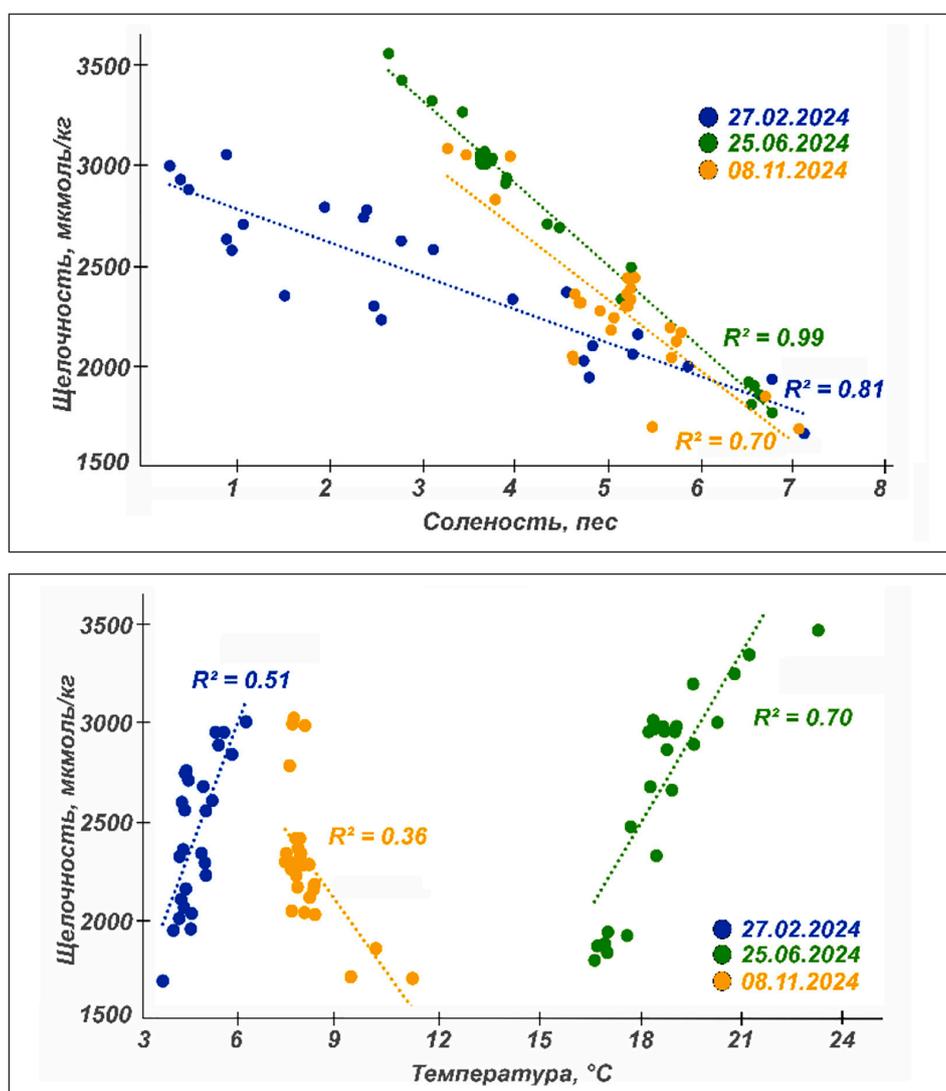


Рис. 5. Взаимосвязь общей щелочности, солености и температуры в зоне смешения р. Преголи с водами юго-восточной части Балтийского моря (коэффициенты достоверности аппроксимации  $R^2$ )

Источник: составлено авторами по результатам данного исследования

В летний период за счет повышения температуры воды увеличивается биологическая активность. Другие процессы также могли способствовать сезонным изменениям щелочности, например трансформация соединений азота. Известно, что при усвоении нитратов во время фотосинтеза щелочность увеличивается за счет аммонификации и денитрификации и уменьшается за счет нитрификации [18]. Летом концентрации нитратов в Калининградском заливе минимальны, что также способствует повышенным величинам щелочности (максимальное значение 3510 мкмоль/кг наблюдалось в июне у устья реки). В зимний и осенний периоды происходило усиление влияния морских вод с низкой щелочностью (1900 мкмоль/кг), а также накопление нитритов из-за почти полного прекращения вегетации водорослей, что привело к снижению значений в зоне смешения (2022–2697 и 2057–2318 мкмоль/кг соответственно). Снижение (потеря) щелочности от летнего периода к зимнему может сопровождаться минеральным осаждением карбоната кальция.

Схожие с исследуемым районом условия характерны для лагунообразного эстуария р. Одер (Польша): соленость, сезонный ход биологических процессов, высокая продуктивность. Исследование устья р. Одер в 2016 г. [17] показало, что щелочность изменялась в ноябре от 2940 у устья до 1771 мкмоль/кг в морской части разреза (Померанская бухта) и была значительно ниже в мае – около 2000 мкмоль/кг по всему разрезу за исключением устьевой зоны. Полученные авторами значения для эстуария р. Преголи для ноября (в данный сезон температура воды и соленость схожи для обеих акваторий) и их пространственное распределение были сопоставимы с эстуарием р. Одер. Исследование, проведенное вблизи устья Вислы (Польша), показало, что она является значительным источником общей щелочности в Балтийском море, обогащая воды Гданьского залива, по сравнению с открытой Балтикой. При изучении пространственной и сезонной изменчивости сбросов р. Вислы был сделан вывод о существенном вкладе системы  $\text{CO}_2$  в южную часть Гданьского залива [19, 20].

Реки переносят щелочность, образуящуюся в результате процессов выветривания, вниз по течению, что влияет на систему  $\text{CO}_2$  в прибрежной зоне морей. Поскольку речной сток может либо увеличивать, либо уменьшать щелочность в прибрежной зоне

моря, буферная емкость эстуария будет соответственно увеличиваться или уменьшаться. Общая щелочность в Калининградском заливе значительно превышала фоновые морские значения (достигая 3510 мкмоль/кг летом в устьевой зоне), что связано с поступлением вод рек. В зоне морского влияния залива и в открытом море щелочность находилась в диапазоне 1682–1896 мкмоль/кг и менялась синхронно с показателями рН, отражая сезонную биологическую активность и разбавление вод.

#### *Открытое море*

В открытом море колебания рН были более сглаженными, в пределах 7,79–8,42, с максимумом весной. Известно [4], что к низкому уровню рН приводят условия отсутствия или дефицита растворенного в воде кислорода, которые способствуют выбросу  $\text{CO}_2$  при минерализации донных осадков, и на мелководье такие районы тоже существуют (например, бухта Экернфьорде [21]). Однако район изучения в открытом море находится вне зоны устойчивого дефицита кислорода [22], поэтому фактор лимитирования кислорода можно не учитывать.

В поверхностном горизонте ФТ наблюдаются сезонные изменения. Наибольшие значения отмечены в период весеннего цветения воды (апрель), затем, по мере снижения продуктивности, происходит уменьшение рН до минимума в декабре. Аналогичный сезонный ход значений рН выявлен для центральной части Балтийского моря (к востоку от о. Готланд) и обусловлен потреблением  $\text{CO}_2$ . Соответствующая разница между рН зимой и летом составляет ~0,5 единицы [7].

За последние два десятилетия было обнаружено последовательное увеличение концентрации общей щелочности в Балтийском море [23]. Исторические наблюдения показывают, что эта положительная динамика общей щелочности могла сохраняться в течение длительных периодов XX в., за исключением Ботнического залива. Кислотные осадки способствуют уменьшению поступления щелочности с водосбора северных территорий и увеличивают поступление щелочности с водосбора южного региона Балтики, в то время как увеличение содержания  $\text{CO}_2$  в атмосфере и деятельность по известкованию являются полностью положительными факторами. Предсказуемость будущих процессов подкисления в прибрежных морях ограничена изменчивостью компонентов системы  $\text{CO}_2$ ,

особенно щелочностью, которая формирует основу взаимозависимости  $\text{CO}_2$ -рН [23].

Воды южной части Балтийского моря, при пересчете на нулевую соленость, приносят гораздо больше общей щелочности. Для Рижского залива значения общей щелочности речных вод составляют около 3000 мкмоль/л, тогда как для Финского и Ботнического заливов это значения равны 600 и 150 мкмоль/л соответственно. В зоне смешения этих вод, в центральной части Балтийского моря, значения общей щелочности равны 1600 мкмоль/л [7]. Значения общей щелочности, измеренные в поверхностном горизонте ФТ, изменялись от 1682 до 1896 мкмоль/кг, что обусловлено влиянием стока рек.

Поскольку мелководные морские районы перенасыщены карбонатами, растворение карбонатов обычно происходит в кислородсодержащей зоне морских отложений, где кислотность создается посредством аэробного дыхания. Морские отложения составляют ~40% внешнего поступления щелочности в океан, а остальная часть приходится на речной сток растворенных соединений. Помимо природных факторов на распределение щелочности оказывают влияние и антропогенные нарушения морского дна, вызванные донным тралением при рыболовстве и дноуглубительными работами [24]. Подобные механические воздействия на донные осадки влияют на поток углерода за счет стимуляции минерализации органического углерода. Таким образом, разрушение щелочности антропогенным нарушением морского дна приводит к скрытой эмиссии  $\text{CO}_2$ . В районе исследования ни донное траление, ни работы по дноуглублению не ведутся [25], поэтому данный фактор влияния также можно исключить.

Таким образом, Калининградский залив характеризуется значительно большей сезонной и пространственной изменчивостью гидрохимических параметров по сравнению с открытым морем. Это связано с влиянием пресных вод, мелководностью, интенсивными биогеохимическими процессами и локальными условиями циркуляции воды.

### Заключение

Исследование зоны смешения речных, заливных и морских вод выявляло более значительные сезонные колебания рН и щелочности по сравнению с открытым морем. В зоне смешения установлена обратная связь между соленостью и общей щелочностью: коэффициент детерминации от 0,70 осенью

до 0,99 летом. Значения рН в зимний период понижались (до 6,93), а летом происходило их повышение (до 9,26). В осенний сезон распределение было сравнительно однородным (в диапазоне 7,20–8,18). Такая динамика соотносится с увеличением речного стока в конце зимы и увеличением интенсивности развития фитопланктона в заливе летом.

Общая щелочность во все сезоны была обратно пропорциональна солености. Установлено, что речной сток существенно повышал общую щелочность в устьевой зоне, особенно в летний период (до 3510 мкмоль/кг), и формировал выраженные градиенты гидрохимических параметров. Река Преголя, как и другие реки южной Балтики, несет повышенную щелочность, увеличивая ее в прибрежной зоне моря.

В открытом море изменчивость параметров была незначительной. Изменение температуры и солености соответствовало сезонному ходу. Показатель рН варьировался от 7,79 до 8,42 (с наименьшими значениями в декабре и наибольшими в апреле). Общая щелочность изменялась незначительно, от 1682 в декабре до 1896 мкмоль/кг в мае, что связано с однородностью воды по солености, небольшой глубиной (отсутствием галоклина и оксиклина). Полученные для юго-восточной части Балтийского моря среднегодовые значения щелочности отражают общую закономерность увеличения щелочности от северных районов Балтийского моря к южным, что связано с составом отложений водосборных бассейнов впадающих рек.

Полученные данные подчеркивают важную роль прибрежных эстуарных систем, подверженных влиянию речного стока и интенсивным биогеохимическим процессам, в формировании гидрохимического режима и углеродного баланса полузаткнутых морских бассейнов. Результаты могут быть использованы при расчете потоков углекислого газа на границе вода – воздух, что необходимо учитывать при оценке регионального климата и его изменчивости.

*Авторы благодарят ООО «Морское венчурное бюро» за отбор проб в открытом море, выполненном в рамках договора о научном сотрудничестве между ООО «МВБ» и Атлантическим отделением ИО РАН.*

### Список литературы

1. Романкевич Е.А., Ветров А.А. Углерод в Мировом океане. М.: ГЕОС, 2021. 352 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47203034> (дата обращения: 10.05.2025). DOI: 10.34756/GEOS.2021.16.37857. ISBN 978-5-89118-835-8.

2. A Research strategy for ocean-based carbon dioxide removal and sequestration. 2022. Washington, DC: The National Academies Press. 322 p. [Электронный ресурс]. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35533244/> (дата обращения: 20.05.2025). DOI: 10.17226/26278. ISBN 9780309087612.
3. Bach L.T. The additionality problem of ocean alkalinity enhancement // *Biogeosciences*. 2024. Vol. 21, Is. 1. P. 261–277. URL: <https://bg.copernicus.org/articles/21/261/2024/> (дата обращения: 21.05.2025). DOI: 10.5194/bg-21-261-2024.
4. Anschütz A.-A., Lencina-Avila J.M., Rehder G., Cahill B., Neumann T., Radtke H. Direct effects of ocean alkalinity enhancement in the Baltic Sea—results from in-silico experiments // *Frontiers in Climate*. 2025. Vol. 7. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/climate/articles/10.3389/fclim.2025.1450468/full> (дата обращения: 14.05.2025). DOI: 10.3389/fclim.2025.145046.
5. Dale A.W., Geilert S., Diercks I., Fuhr M., Perner M., Scholz F., Wallmann K. Seafloor alkalinity enhancement as a carbon dioxide removal strategy in the Baltic Sea // *Communications Earth & Environment*. 2024. Vol. 5, Is. 1. P. 452. URL: <https://www.nature.com/articles/s43247-024-01569-3> (дата обращения: 14.05.2025). DOI: 10.1038/s43247-024-01569-3.
6. Middelburg J.J., Soetaert K., Hagens M. Ocean alkalinity, buffering and biogeochemical processes // *Reviews of Geophysics*. 2020. Vol. 58, Is. 3. P. e2019RG000681. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2019RG000681> (дата обращения: 14.05.2025). DOI: 10.1029/2019RG000681.
7. Wesslander K. The Carbon Dioxide System in the Baltic Sea Surface Waters. Department of Earth Sciences, University of Gothenburg, Sweden. 2011. 36 p. [Электронный ресурс]. URL: <http://hdl.handle.net/2077/25442> (дата обращения: 14.05.2025).
8. Kuliński K., Hammer K., Schneider B., Schulz-Bull D. Remineralization of terrestrial dissolved organic carbon in the Baltic Sea // *Marine Chemistry*. 2016. Vol. 181. P. 10–17. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304420316300160> (дата обращения: 14.05.2025). DOI: 10.1016/j.marchem.2016.03.002.
9. Чубаренко Б.В., Двоглазова Н.В., Боскачев Р.В., Шушарин А.В. Пространственно-временная изменчивость гидрологических характеристик в зоне смешения реки Преголи (Юго-Восточная Балтика) и методические подходы к ее изучению // *Океанологические исследования*. 2024. Т. 52. № 1. С. 157–176. URL: <https://jor.ocean.ru/index.php/jor/article/view/1028> (дата обращения: 14.05.2025). DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2024.52(1).8.
10. Korobchenkova K.D., Aleksandrov S.V., Semenova A.S., Stont Zh.I., Ulyanova M.O. Influence of hydrometeorological conditions on the plankton distribution in the estuary of the Pregolya River and the coastal part of the Baltic Sea // *Oceanology*. 2023. Vol. 63. Suppl. 1. P. S188–S201. URL: <https://link.springer.com/article/10.1134/S0001437023070068> (дата обращения: 14.05.2025). DOI: 10.1134/S0001437023070068.
11. Наумов В.А., Маркова Л.В. Материалы инженерно-гидрометеорологических изысканий в бассейне реки Преголи. Внутригодовое распределение стока // *Вестник науки и образования Северо-Запада России*. 2015. № 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/materialy-inzhenerno-gidrometeorologicheskikh-izyskaniy-v-bassejne-reaki-pregoli-vnutrigodovoe-raspredelenie-stoka> (дата обращения: 16.05.2025).
12. Бруевич С.В. Инструкция по производству химических исследований морской воды. М.: Изд-во Главсевморпути, 1944. 83 с.
13. Александров С.В., Сташко А.В. Пространственное распределение и сезонная динамика биогенных элементов в Вислинском заливе в 2019 году // *Известия КГТУ*. 2021. № 60. С. 11–21. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/prostranstvennoe-raspredelenie-i-sezonnaya-dinamika-biogennykh-elementov-v-vislinskom-zalive-v-2019-godu> (дата обращения: 06.06.2025).
14. Кирилков Н.Ю., Сташко А.В., Чукалова Н.Н., Кригер О.В. Исследование состояния калининградского гидрологического района Вислинского залива по химическим и микробиологическим показателям в 2018 году // *Вестник молодежной науки*. 2020. № 2 (24). С. 8. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-sostoyaniya-kaliningradskogo-gidrologicheskogo-rajona-vislinskogo-zaliva-po-himicheskim-i-mikrobiologicheskim> (дата обращения: 01.06.2025).
15. Сташко А.В. Современные кислородные условия в крупной мелководной лагуне Юго-Восточной Балтики (Вислинский залив) // *Астраханский вестник экологического образования*. 2021. № 3 (63). С. 42–49. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46195412> (дата обращения: 14.05.2025).
16. Семенова А.С., Дмитриева О.А. Планктонные сообщества системы «река Преголя – Вислинский залив – Калининградский морской канал (КМК) – Балтийское море» // *Труды Зоологического института РАН*. 2023. Т. 327. № 3. С. 430–450. URL: [https://www.zin.ru/journals/trudyzin/doc/vol\\_327\\_3/TZ\\_327\\_3\\_Semyonova.pdf](https://www.zin.ru/journals/trudyzin/doc/vol_327_3/TZ_327_3_Semyonova.pdf) (дата обращения: 14.05.2025). DOI: 10.31610/trudyzin/2023.327.3.430.
17. Stokowski M., Schneider B., Rehder G., Kuliński K. The characteristics of the CO<sub>2</sub> system of the Oder River estuary (Baltic Sea) // *Journal of Marine Systems*. Vol. 211. 2020. P. 103418. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924796320301147> (дата обращения: 14.05.2025). DOI: 10.1016/j.jmarsys.2020.103418.
18. Sarmiento J., Gruber N. Ocean Biogeochemical Dynamics // *Physics Today*. 2007. Vol. 60 (6). URL: <https://www.jstor.org/stable/j.ctt3fgxqx> (дата обращения: 14.05.2025). DOI: 10.1063/1.2754608.
19. Omstedt A., Gustafsson E., Wesslander K. Modelling the uptake and release of carbon dioxide in the Baltic Sea surface water // *Continental Shelf Research*. 2009. Vol. 29, Is. 7. P. 870–885. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0278434309000521> (дата обращения: 20.05.2025). DOI: 10.1016/j.csr.2009.01.006.
20. Stokowski M., Winogradov A., Szymczycha B., Carstensen J., Kuliński K. The CO<sub>2</sub> system dynamics in the vicinity of the Vistula River mouth (the southern Baltic Sea): A baseline investigation // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2021. Vol. 258. P. 107444. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0272771421002973> (дата обращения: 20.05.2025). DOI: 10.1016/j.ecss.2021.107444.
21. Bange H.W., Hansen H.P., Malien F., Laß K., Dale A.W., Karstensen J., Petereit C., Friedrichs G. Boknis Eck Time Series Station (SW Baltic Sea): Measurements from 1957 to 2010 // *Open Access LOICZ Imprint*. 2011. P. 16–22. URL: <https://oceanrep.geomar.de/id/eprint/12198/> (дата обращения: 14.05.2025).
22. Дубравин В.Ф. Гидрохимический режим // *Нефть и окружающая среда Калининградской области*. Калининград: Терра Балтика. 2012. Т. II. Море. С. 106–120. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.researchgate.net/publication/315491612\\_Gidrohimicheskij\\_rezim](https://www.researchgate.net/publication/315491612_Gidrohimicheskij_rezim) (дата обращения: 14.05.2025).
23. Müller J.D., Schneider B., Rehder G. Long-term alkalinity trends in the Baltic Sea and their implications for CO<sub>2</sub>-induced acidification // *Limnology and Oceanography*. 2016. Vol. 61, Is. 6. P. 1984–2002. URL: <https://aslopubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/lno.10349> (дата обращения: 14.05.2025). DOI: 10.1002/lno.10349.
24. Van de Velde S.J., Hylén A., Meysman F.J.R. Ocean alkalinity destruction by anthropogenic seafloor disturbances generates a hidden CO<sub>2</sub> emission // *Science advances*. 2025. Vol. 11, Is. 13. URL: <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.adp9112> (дата обращения: 14.05.2025). DOI: 10.1126/sciadv.adp9112.
25. Ulyanova M., Danchenkov A. Maritime potential of the Russian sector of the south-eastern Baltic Sea and its spatial usage // *Baltica*. 2016. Vol. 29 (2). P. 133–144. URL: [https://baltica.gamtc.lt/administravimas/uploads/2016\\_vol29\(2\)-05\\_5ebd068d5dc24.pdf](https://baltica.gamtc.lt/administravimas/uploads/2016_vol29(2)-05_5ebd068d5dc24.pdf) (дата обращения: 10.05.2025). DOI: 10.5200/baltica.2016.29.12.

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ АБИОТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ  
НА ДИНАМИКУ РАЗМЕРНОГО РЯДА И БИОМАССЫ  
ПОПУЛЯЦИИ ИНВАЗИВНОГО МОЛЛЮСКА *ANADARA  
KAGOSHIMENSIS* (TOKUNAGA, 1906) В АЗОВСКОМ МОРЕ**

**Волощук М.С., Картамышева Т.Б., Шевцова Е.А.,  
Жукова С.В., Подмарева Т.И., Елфимова Н.С.**

*Азово-Черноморский филиал ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт  
рыбного хозяйства и океанографии», Ростов-на-Дону, e-mail: mixail.voloshhuk@gmail.com*

На фоне ускоряющихся геоэкологических изменений акватории Азовского моря, воздействующих на прибрежные экосистемы, изучение факторов, влияющих на жизнеспособность и пространственно-временную организацию инвазивных видов, приобретает особую актуальность. В представленной работе проведен комплексный анализ влияния трех ключевых абиотических факторов: солености, температуры и кислородного режима – на размерный ряд и биомассу инвазивного двустворчатого моллюска *Anadara kagoshimensis* (Tokunaga, 1906) в Азовском море. Обсуждаются механизмы осморегуляции и гипоксической толерантности *A. kagoshimensis*, а также сезонные и климатические модификации абиотических условий. Исследование сочетает полевые наблюдения с элементами статистического анализа, что позволяет не только выявить корреляционные зависимости, но и наметить возможные физиологические механизмы адаптации вида к изменяющимся условиям среды. При использовании данных гидробиологических съемок за 2022–2024 гг., авторами было установлено, что повышение солености является ключевым фактором, оказывающим наиболее выраженное влияние на рост, развитие и накопление биомассы вида. Особое внимание уделено адаптации вида к условиям Азовского моря, включая устойчивость к низкому содержанию кислорода и репродуктивный успех. Результаты подчеркивают комплексное взаимодействие экологических факторов, определяющих размерный ряд *Anadara kagoshimensis*, и имеют значение для прогнозирования динамики популяции этого инвазивного вида в условиях изменяющейся экосистемы.

**Ключевые слова:** *Anadara kagoshimensis*, Азовское море, экологические факторы, соленость, температура, кислородный режим, размерный ряд, инвазивный вид

**ASSESSMENT OF THE IMPACT OF ABIOTIC FACTORS  
ON THE DYNAMICS OF SIZE RANGE AND BIOMASS  
OF THE INVASIVE MOLLUSK *ANADARA KAGOSHIMENSIS*  
(TOKUNAGA, 1906) IN THE SEA OF AZOV**

**Voloschuk M.S., Kartamysheva T.B., Shevtsova E.A.,  
Zhukova S.V., Podmareva T.I., Elfimova N.S.**

*Azov-Black Sea Branch of the Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography,  
Rostov-on-Don, e-mail: mixail.voloshhuk@gmail.com*

Against the backdrop of accelerating geological and ecological changes in the *Sea of Azov* waters, which are impacting coastal ecosystems, research into factors affecting the viability and spatial-temporal organization of invasive species has become particularly relevant. This study provides a comprehensive analysis of three key abiotic factors – salinity, temperature and oxygen regime – on the size and biomass range of the invasive bivalve mollusk *Anadara kagoshimensis* (Tokunaga, 1906) in the *Sea of Azov*. It discusses the mechanisms of osmoregulation and hypoxia tolerance of *kagoshimensis* as well as seasonal and climate-related variations in abiotic conditions. The study combines field observations with statistical analysis, allowing not only to identify correlations but also to delineate possible physiological mechanisms for the species' adaptation to changing environmental circumstances. Using data of hydrobiological surveys conducted between 2022 and 2024, the study found that increased salinity was a significant factor with the most pronounced impact on the growth, development, and biomass accumulation of the species under study. Special attention was paid to how the species adapts to the conditions of the *Sea of Azov*, including its resistance to low oxygen levels and reproductive success. The findings emphasize the complex interplay of environmental factors that influence the size range of *Anadara kagoshimensis* and are crucial for predicting population trends of this invasive species within a changing ecosystem.

**Keywords:** *Anadara kagoshimensis*, *Sea of Azov*, environmental factors, salinity, temperature, oxygen regime, size range, invasive species

**Введение**

В последние десятилетия инвазивный двустворчатый моллюск *Anadara kagoshimensis* распространился от ареалов

западной части Тихого океана в прибрежные воды Черного и Азовского морей, существенно трансформируя бентосные сообщества и конкурентные взаимодействия

[1]. Азовское море с его мелководным характером, выраженными градиентами солености (5–16‰), сезонными колебаниями температуры (3–28 °С) и периодическими эпизодами гипоксии представляет собой уникальную природно-географическую лабораторию для изучения адаптивных реакций инвазивных видов. В то время как ряд работ подчеркивает важность температурного и кислородного стрессов для физиологии моллюсков, наши предварительные данные свидетельствуют о доминирующей роли соленостных градиентов в формировании размерного ряда и биомассы *A. kagoshimensis* на разных участках Азовского моря.

Соленость воды – один из ключевых экологических факторов, который оказывает значительное влияние на рост и развитие моллюска *Anadara kagoshimensis* в Азовском море. Этот вид, известный своей эвригалинностью (способностью переносить широкий диапазон солености), все же имеет оптимальные условия, при которых он достигает максимальных размеров [2].

Соленость напрямую влияет на физиологические процессы моллюска, особенно на осморегуляцию – поддержание водно-солевого баланса в организме. *Anadara kagoshimensis* происходит из регионов с высокой соленостью, таких как Японское море, где она составляет 30–35 ‰. В Азовском море исторически соленость была значительно ниже – около 10–12 ‰, что создавало менее благоприятные условия для этого вида и может быть лимитирующим фактором для роста и развития данного вида моллюска [3].

При низкой солености (например, 10–12‰) моллюски тратят больше энергии на осморегуляцию, чтобы компенсировать разницу между внутренней средой организма и окружающей водой. Это снижает количество энергии, доступной для роста, что приводит к замедлению развития и уменьшению размеров особей.

При высоком показателе солености затраты на осморегуляцию уменьшаются. Энергия, которая раньше уходила на поддержание баланса, направляется на рост и развитие, что позволяет моллюскам достигать больших размеров.

Авторами отмечено, что соленость влияет не только на рост взрослых особей, но и на репродуктивный успех, что косвенно сказывается на размерах популяции. Оптимальная соленость улучшает выживаемость личинок и их развитие.

При благоприятной солености (ближе к 30 ‰) личинки развиваются быстрее, а потери среди них сокращаются. Это увеличивает численность популяции, снижает конкуренцию за пищу и пространство, что позволяет выжившим особям становиться крупнее.

При неоптимальной солености выживаемость личинок падает, численность популяции уменьшается, а конкуренция за ресурсы возрастает. В таких условиях рост особей ограничивается, и они остаются мелочью.

Поскольку *Anadara kagoshimensis* – инвазивный вид, соответственно, и его популяция постепенно адаптируется к местным условиям. Этот процесс включает изменения в физиологии, такие как улучшение механизмов осморегуляции, что позволяет моллюскам эффективнее справляться с неидеальной соленостью. Со временем адаптация может привести к увеличению размеров особей даже в условиях, отличающихся от родных (30–35 ‰). Однако на начальных стадиях инвазии размеры моллюсков в Азовском море были меньше, чем в Японском море, что связано с периодом привыкания к новым условиям [2].

Температура воды – также один из ключевых факторов, определяющих рост и размер моллюска *Anadara kagoshimensis* в Азовском море. Анадара, адаптируясь к местным условиям, демонстрирует четкую зависимость своих физиологических процессов и жизненного цикла от температуры окружающей среды.

Температура напрямую влияет на метаболизм *Anadara kagoshimensis*, так как этот моллюск является пойкилотермным организмом – его внутренняя температура зависит от температуры воды. Это определяет скорость всех биохимических реакций в его теле, включая питание, дыхание и рост [3].

Оптимальная температура (15–25 °С): В этом диапазоне метаболизм моллюска работает наиболее эффективно. Он активно фильтрует воду, усваивает пищу и наращивает биомассу, что позволяет ему быстро расти и достигать больших размеров.

Низкая температура (ниже 10 °С): При таких значениях метаболизм замедляется, что снижает скорость роста. Моллюски в таких условиях растут медленнее и часто остаются меньшими по размеру.

Высокая температура (выше 28 °С): Чрезмерное тепло ускоряет метаболизм, однако вызывает стресс. Длительное воздействие высоких температур может привести к тепловому шоку, замедлению роста

или даже гибели, что ограничивает размеры особей.

Будучи инвазивным видом, *Anadara kagoshimensis* обладает широким диапазоном температурной толерантности (5–28 °C) – данная особенность позволяет ему выживать в Азовском море с его резкими сезонными колебаниями. Тем не менее для достижения максимальных размеров необходимы продолжительные периоды с температурой в оптимальном диапазоне (15–25 °C). Со временем популяция может адаптироваться к местным условиям, что потенциально способствует увеличению размеров особей [3].

Если говорить о влиянии кислородного режима, *Anadara kagoshimensis*, вероятно, использует анаэробный метаболизм для выживания в условиях низкого кислорода, как показано в исследованиях метаболических реакций родственных видов, таких как *Anadara inaequalis* [4]. Важно отметить, что Азовское море характеризуется мелководностью и ограниченной водообменностью, что делает его уязвимым к гипоксическим условиям, особенно в летние месяцы [5]. Однако анадара демонстрирует высокую устойчивость к низким уровням кислорода благодаря наличию гемоглобина в крови, что позволяет эффективно транспортировать кислород даже в условиях гипоксии. Исследования показали, что этот моллюск способен переходить от аэробного к анаэробному метаболизму без значительного ущерба для жизнедеятельности [6].

В условиях 14-дневного голодания и различных уровней кислорода *Anadara kagoshimensis* показал способность увеличивать скорость дыхания на 35–55%, что свидетельствует об активации окислительных процессов в организме [7]. Благодаря своей устойчивости к гипоксии, *Anadara kagoshimensis* может успешно колонизировать зоны с низким содержанием кислорода, где другие виды испытывают стресс или погибают [8]. Это приводит к изменению структуры бентосных сообществ и может оказывать влияние на пищевые цепи и общее состояние экосистемы Азовского моря [1].

**Цель исследования** – оценка влияния абиотических факторов (солёности, температуры и кислородного режима) на динамику размерного ряда и биомассы популяции инвазивного моллюска *Anadara kagoshimensis* (*Tokunaga, 1906*) в Азовском море.

#### **Материалы и методы исследования**

В основу исследования легли данные гидробиологических исследований Азовского

моря, проведенных Азово-Черноморским филиалом ФГБУН «ВНИРО» – «АзНИИРХ» с 2022 по 2024 г. Сетка гидробиологических съемок представлена на рисунке.

Для сравнения полученных данных биомассы и размерного ряда анадары с абиотическими факторами, такими как солёность, температура вод и показатель растворенного кислорода, авторами использовался коэффициент корреляции Спирмена [10]. В рамках исследования было изучено 89 проб бентоса. Расположение станций отбора проб представлено на рисунке.

Первичная обработка проб выполнялась непосредственно на борту исследовательского судна. Промывание бентоса осуществлялось с использованием сит с размерами ячеек 5 мм (верхнее сито) и 0,3 мм (нижнее сито). После промывания остатки с обоих сит фиксировались в 75 %-ном растворе этилового спирта. Камеральная обработка проб проводилась с использованием бинокулярного микроскопа. Для построения размерных рядов моллюсков применялся шаг в 1 мм [9].

#### **Результаты исследования и их обсуждение**

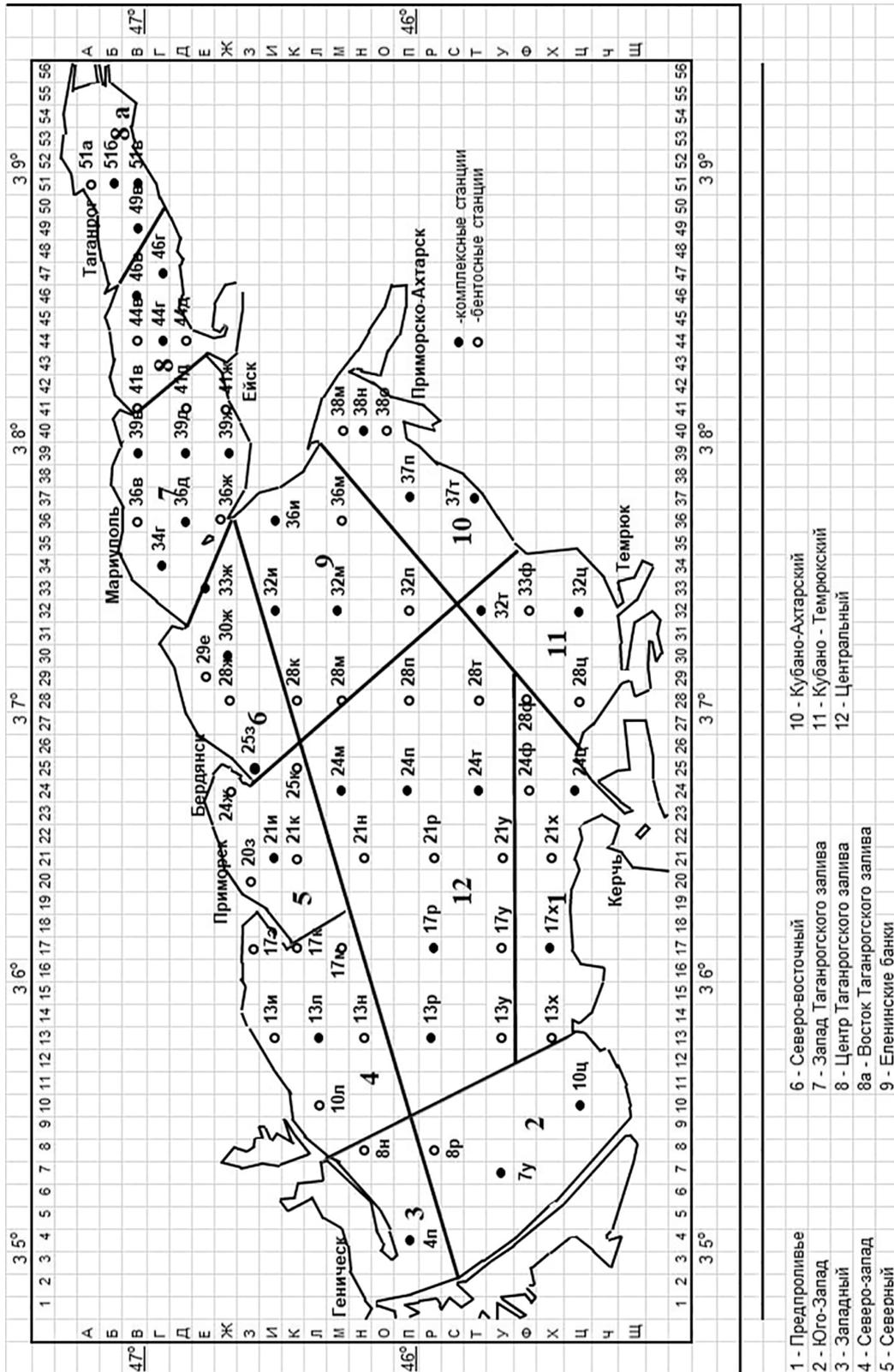
Согласно представленным в табл. 1 данным, во всех наблюдаемых периодах наибольший показатель солёности зарегистрирован в районе Керченского пролива, а также в юго-западной акватории Азовского моря, поскольку в упомянутых зонах происходит адвекция вод Черного моря [11].

В табл. 2 представлен показатель растворенного кислорода в Азовском море в период с 2022 по 2024 г.

Средний показатель  $O_2$  в водах Азовского моря за наблюдаемый трехлетний период составлял 6,86–8,06 мг/л в зависимости от района акватории. Установлено, что идеальный уровень растворенного кислорода для развития *Anadara kagoshimensis* составляет 6–8 мг/л [12].

Однако кратковременная гипоксия (ниже 2 мг/л) может вызывать стресс, а длительная гипоксия приводит к массовой смертности.

Показатель растворенного  $O_2$  по станциям и общее среднее 7,24 мг/л в целом обеспечили оптимальную среду для роста и размножения анадары. Однако были зафиксированы временные снижения показателя растворенного кислорода ниже 5 мг/л на некоторых станциях – в 2023 г. на станции 11 и в 2024 г. на станции 10.



Сетка гидробиологических съемок «АзНИИРХ» в Азовском море  
 Источник: составлено авторами по результатам данного исследования

Таблица 1

Показатель солености в Азовском море за 2022–2024 гг., ‰

Год	Районы												
	1	2	3	4	5	6	7	8	8а	9	10	11	12
2022	15,84	15,35	15,11	14,79	14,35	13,81	12,18	8,03	5,49	8,03	5,49	14,30	13,28
2023	15,39	15,24	15,26	15,19	15,22	14,44	12,54	7,65	4,21	7,65	4,21	15,08	14,17
2024	15,43	14,99	14,95	14,92	14,81	14,54	12,74	8,77	6,00	8,77	6,00	14,61	14,47

Источник: составлено авторами по результатам данного исследования.

Таблица 2

Показатель растворенного кислорода в акватории Азовского моря за 2022–2024 гг., мг/л

Год	Районы											
	1	2	3	4	5	6	7	8а	9	10	11	12
2022	7,8	7,8	8,6	6,2	7,0	9,0	7,4	8,3	7,4	7,9	7,8	6,1
2023	7,1	6,6	7,2	6,7	7,1	7,4	7,6	7,6	7,1	6,6	4,7	6,9
2024	7,0	7,4	8,4	7,7	8,1	6,3	8,3	7,7	5,8	4,9	7,0	6,9
Средн.	7,3	7,2	8,1	6,9	7,6	7,6	7,7	7,9	6,8	6,5	6,5	6,6

Источник: составлено авторами по результатам данного исследования.

Таблица 3

Среднегодовой показатель температурного режима в Азовском море за 2022–2024 гг., °С

Год	Районы												
	1	2	3	4	5	6	7	9	10	11	12	8	8а
2022	20,5	19,8	19,75	19,56	19,5	20,9	20,9	20,8	22,2	22,9	20,6	19,7	19,2
2023	22,4	22,5	21,8	21,5	21,4	21,1	19,9	20,9	19,9	20,7	21,5	20,3	20,2
2024	21,5	21,7	21,7	22,1	21,6	20,3	19,6	19,4	19,4	20,1	20,6	20,8	21,6

Источник: составлено авторами по результатам данного исследования.

Среднегодовые показатели температурного режима воды по районам наблюдений, важные для анализа температурной адаптации и метаболической активности *Anadara kagoshimensis*, представлены в табл. 3.

Нативный ареал обитания *Anadara kagoshimensis* охватывает умеренные воды западной части Тихого океана, включая прибрежные районы Японии, Южной Кореи и Китая. Согласно доступным данным, температура воды в этих регионах варьируется в зависимости от сезона [12]. В зимний период температура может опускаться до 3–8 °С, что характерно для таких мест, как залив Йоджа в Южной Корее. Летом температура поднимается до 23–28 °С. В межсезонье (весна и осень) температура

составляет около 13–18 °С. Оптимальный диапазон для ее роста и размножения, скорее всего, находится в пределах 15–25 °С, так как при максимальных летних температурах (28 °С) моллюск может испытывать физиологический стресс [3].

Среднегодовое значение температуры по всем наблюдаемым станциям варьируется в диапазоне 19,4–21,7 °С, что соответствует оптимальному режиму для роста и развития данного вида моллюска.

В табл. 4 приведены данные по биомассе *Anadara kagoshimensis* в различных частях Азовского моря за 2022–2024 гг., что отражает пространственную и временную динамику накопления биомассы популяцией вида.

Таблица 4

Биомасса анадары в Азовском море за 2022–2024 гг., г/м<sup>2</sup>

Год	Районы												
	1	2	3	4	5	6	7	8	8a	9	10	11	12
2022	12102,3	10080,4	–	–	–	375,8	149,2	–	–	594,9	1531,8	1108,0	8454,9
2023	7059,3	1920,2	1410,1	812,9	1747,8	2666,8	128,2	–	–	61,3	773,0	1729,4	11585,1
2024	5675,0	3859,7	2431,7	1653,4	98,5	24,9	–	–	–	221,2	1020,8	1147,6	3615,7

Источник: составлено авторами по результатам данного исследования.

Таблица 5

Количественные показатели размерных рядов анадары в Азовском море, экз./м<sup>2</sup>

Год	Размерный ряд, мм	Количество по районам, экз./м <sup>2</sup>												
		1	2	3	4	5	6	7	9	10	11	12	8	8a
2022	От 3 до 5	–	285	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	От 6 до 10	–	130	–	–	–	–	–	–	10	280	210	–	–
	Больше 11	3970	3920	–	–	–	850	25	915	5	1810	2680	–	–
2023	От 3 до 5	–	200	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	От 6 до 10	10	280	–	–	–	440	–	–	–	–	–	–	–
	Больше 11	3120	2160	1080	480	360	2490	5	25	45	970	2510	–	–
2024	От 3 до 5	200	310	–	–	130	–	–	–	–	–	310	–	–
	От 6 до 10	1360	–	–	–	315	–	–	–	–	–	–	–	–
	Больше 11	1745	20	1280	580	15	–	–	80	31	320	760	–	–

Источник: составлено авторами по результатам данного исследования.

В 2022–2024 гг. в западной части Азовского моря (районы 9–12) соленость ниже (5–8‰), а в центрально-восточных районах (3–7) она выше (12–15‰). Максимальная биомасса анадары наблюдается в районах с наибольшим показателем солености: в центре, на востоке, а также на юге, в районе Керченского пролива, соленость ~14–16 ‰ соответствует оптимуму – здесь наблюдались наибольшие показатели биомассы. В западной же части (районах 6, 7) соленость стремилась к нижнему пределу выживания, поэтому биомасса анадары снижена.

Данные, представленные в табл. 5, демонстрируют количественные характеристики размерных рядов особей анадары по районам, что позволяет оценить распределение размеров в зависимости от условий окружающей среды.

В Керченском проливе (район 1) и на западных участках (районы 2 и 3) накоплены

максимальные концентрации крупного размера моллюска (более 11 мм). Так, в 2022 г. плотность крупных (более 11 мм) особей в районе 1 достигала 3970 экз./м<sup>2</sup>, в районе 2 – 3920 экз./м<sup>2</sup>, тогда как в центральном районе 12 – 2680 экз./м<sup>2</sup>.

В 2023 г. аналогичное явление: 3120 и 2160 экз./м<sup>2</sup> в районах 1 и 2 против 2510 экз./м<sup>2</sup> в районе 12.

В 2024 г. наблюдалось общее снижение, но все же наивысшие показатели по-прежнему наблюдались в районе 1 (1745 экз./м<sup>2</sup>) и западных участках (район 3 – 1280 экз./м<sup>2</sup>), при более скромном показателе в районе 12 (760 экз./м<sup>2</sup>).

Полученные результаты подчеркнули ключевую роль солености как фактора, ограничивающего рост и численность *Anadara kagoshimensis* в Азовском море. Данные, представленные в табл. 4 и 5, показали высокие значения биомассы, и преобладание крупных особей отмечено именно

в центрально-восточных и южных районах с соленостью ~14–16 ‰, тогда как в западных районах (соленость < 10 ‰) биомасса резко снижена.

Как инвазивному виду, анадаре присуща высокая толерантность к экологическим стрессам [13]. Вид обладает эвригаллиным осморегуляторным аппаратом и устойчив к кратковременным гипоксическим условиям. Представленные в табл. 2 средние показатели растворенного кислорода в изученных районах (~6,5–8,3 мг/л) попали в оптимальный диапазон (6–8 мг/л) для роста анадары. Хотя эпизоды понижения кислорода до ~4–5 мг/л фиксировались (например, в 2023 г. на станции 11), массовой гибели не наблюдалось. Данное наблюдение подтвердило способность вида выдерживать периодические стрессовые фазы (гипоксию), сохраняя выживаемость. Кроме того, биологические особенности (например, высокая плодовитость, быстрая адаптация на генетическом уровне) позволили *Anadara kagoshimensis* эффективно колонизировать новые территории при относительно неблагоприятных условиях [14].

На соленость и кислородный режим Азовского моря значимо повлияли климатические процессы. Весной усиленный сток р. Дон снижал соленость, особенно в северо-восточных районах, создавая пространственные градиенты (исток – опреснение), что сдерживало распространение анадары в этих зонах [15, с. 57]. Летом высокие температуры и слабые ветры способствовали стратификации, что привело к снижению жизнедеятельности бентоса. В осенне-зимний период перемешивание вод улучшило кислородный режим и распределило соленость по акватории, что могло временно улучшать условия для роста моллюсков. С учетом глобальных климатических трендов (усиление циклонной активности, изменение осадков) эти сезонные колебания могут усиливаться или изменяться, что делает прогнозирование динамики популяции особо актуальным [16].

Коэффициенты корреляции показателя солености и количественного показателя анадары во всех трех годах положительны: в 2022 г. обнаружена относительно высокая (умеренная) корреляция (0,62;  $\rho \approx 0,69$ ), в 2023 г. она несколько слабее (0,59;  $\rho \approx 0,59$ ), а в 2024 г. связь выражена значительно слабее (0,36;  $\rho \approx 0,33$ ) [10]. Положительная корреляция указывает на прямую взаимосвязь между соленостью и численностью анада-

ры – с ростом солености наблюдается тенденция к увеличению численности крупноразмерных моллюсков данного вида.

Показатели температурного режима в анализируемые годы, продемонстрированные в табл. 3, находились в пределах, оптимальных для роста и размножения *Anadara kagoshimensis*, поэтому они не могут рассматриваться как лимитирующие факторы в этих районах.

В целом результаты работы показали, что соленость является лимитирующим фактором для роста и накопления биомассы *Anadara kagoshimensis* в Азовском море (влияние которого существенно преобладает над умеренными изменениями температуры и кислородного режима).

### Выводы

В ходе исследования влияния абиотических факторов – в первую очередь солености, температуры и уровня растворенного кислорода – на размерный ряд и биомассу инвазивного моллюска *Anadara kagoshimensis* в Азовском море были получены следующие ключевые результаты.

– Соленость оказалась решающим фактором роста и развития анадары. В районах с более высокой среднегодовой соленостью (~14–16 ‰) средняя биомасса достигала 5000–12000 г/м<sup>2</sup>, количественные показатели крупных моллюсков также были максимальными именно в данных областях.

– Температурный режим в диапазоне 19,4–21,7 °С в большинстве районов соответствовал оптимальному для метаболизма вида (15–25 °С). Длительные периоды высоких температур (> 28 °С) не фиксировались, что благоприятствовало устойчивому росту.

– Кислородный режим (6,86–8,06 мг/л) в целом обеспечил нормальное развитие моллюска, однако единичные эпизоды снижения ниже 5 мг/л (станции 11 и 10) вызвали физиологический стресс без значительной смертности.

– Климатические факторы – сезонные ветры и осадки модифицировали соленость и кислородный баланс: весенний речной сток снизил соленость в северо-восточной части, летняя стратификация уменьшила аэрацию придонных слоев, а осенне-зимние ветровые бури поспособствовали перемешиванию и насыщению кислородом.

Полученные результаты важны для прогноза динамики популяции *A. kagoshimensis* и разработки мер управления инвазивным видом. В частности, мониторинг солености и кислородного режима в сочетании с уче-

том сезонных климатических воздействий позволит точнее предсказывать рост и расселение моллюска. Учитывая, что анадара обладает потенциалом к формированию значительной биомассы, данные о ее экологических предпочтениях могут быть использованы при оценке биоресурсного потенциала отдельных районов Азовского моря.

#### Список литературы

1. Живоглядова Л.А., Ревков Н.К., Фроленко Л.Н., Афанасьев Д.Ф. Экспансия двустворчатого моллюска *Anadara kagoshimensis* (Tokunaga, 1906) в Азовском море // Российский журнал биологических инвазий. 2021. Т. 14. № 1. С. 83–94. DOI: 10.35885/1996-1499-2021-14-1-83-94.
2. Кухарева Т.А., Рычкова В.Н., Солдатов А.А., Андреева А.Ю., Кладченко Е.С. Адаптация *Anadara kagoshimensis* (Tokunaga, 1906) к гипо- и гиперосмотическим условиям среды: реакция гемоцитов // Российский журнал биологических инвазий. 2023. Т. 16. № 3. С. 117–125. DOI: 10.35885/1996-1499-16-3-117-125.
3. Ревков Н.К., Щербань С.А. Особенности биологии двустворчатого моллюска *Anadara kagoshimensis* в Черном море // Экосистемы. 2017. № 9. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-biologii-dvustvorchatogo-mollyusk-anadara-kagoshimensis-v-chernom-more> (дата обращения: 27.04.2025).
4. Kang H.Y., Seong J., Kim C., Lee B.G., Lee I.T., Kang C.K. Seasonal energetic physiology in the ark shell *Anadara kagoshimensis* in response to rising temperature // Frontiers in Marine Science. 2022. Vol. 9. P. 01–19. DOI: 10.3389/fmars.2022.981504.
5. Кладченко Е.С. Влияние гипосмотического стресса на состав гемолимфы *Anadara kagoshimensis* // Российский журнал биологических инвазий. 2021. № 1. С. 44–52. DOI: 10.35885/1996-1499-2021-14-1-95-106.
6. Волкова Т.А. Биогенные факторы и их роль в формировании береговой зоны Азовского Моря // Известия ДГПУ. Естественные и точные науки. 2020. № 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/biogenny-factory-i-ih-rol-v-formirovani-beregovoy-zony-azovskogo-morya> (дата обращения: 28.04.2025).
7. Vialova O.Y., Stolbov A.Y. Respiration of Invasive Bivalve *Anadara kagoshimensis* (Tokunaga, 1906) at 14-Days Starvation and Different Oxygen Content in Sea Water // Journal of Shellfish Research. 2022. Vol. 3. P. 487–494. DOI: 10.2983/035.041.0305.
8. Kolyuchkina G.A., Syomin V.L., Simakova U.V. Benthic community structure near the margin of the oxic zone: A case study on the Black Sea // Journal of Sea Research. 2022. Vol. 227. P. 01–17. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2021.103691.
9. Воловик С.П., Корпакова И.Г. Методы рыбохозяйственных и природоохранных исследований в Азово-Черноморском бассейне: Сборник научно-методических работ. Краснодар: ФГУП «АзНИИРХ», 2005. 352 с.
10. Hammer O. Paleontological Statistics, Version 2.17. Reference Manual. Natural History Museum, university of Oslo. 2012. 229 p.
11. Бердников С.В., Дашкевич Л.В., Кулыгин В.В. Новое состояние гидрологического режима Азовского моря в XXI веке // Доклады российской академии наук. Науки о земле. 2023. № 1. С. 22–30. DOI: 10.31857/S2686739722030057.
12. Kim H., Hirose N., Takayama K. Physical and biological factors underlying long-term decline of dissolved oxygen concentration in the East/Japan Sea // Frontiers in Marine Science. 2022. Vol. 9. P. 01–17. DOI: 10.3389/fmars.2022.851598.
13. Wang Q., Liu Y., Li J., Xie X., Zhang Y. Effects of temperature and salinity on survival and growth of juvenile ark shell *Anadara broughtonii* // Fisheries Science. 2017. Vol. 83. № 4. P. 581–589. DOI: 10.1007/s12562-017-1095-4.
14. Ларина С.А. Содержание химических элементов в тканях и раковинах *Anadara kagoshimensis* из Черного и Азовского морей // Морской биологический журнал. 2024. Т. 9. № 1. С. 73–83. DOI: 10.21072/mbj.2024.09.3.03.
15. Бронфман А.М., Хлебников Е.П. Азовское море. Основы реконструкции. М.: Наука, 1980. 271 с. ISBN: 5-818-30110-9.
16. Янина Т.А. Динамика природной среды Азовского моря в условиях последнего климатического макроцикла // Вестник Российской академии наук. 2023. Т. 93. № 12. С. 1136–1144. DOI: 10.31857/S0869587323120113.

УДК 91:502.7  
DOI

## ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЛАНДШАФТОВ БАСЕЙНА РЕКИ ПЕЛЕДУЙ В ЗОНЕ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ТАЛАКАНСКОГО НЕФТЕГАЗОДОБЫВАЮЩЕГО КОМПЛЕКСА

Николаева Н.А., Пинигин Д.Д.

*ФГБУН ФИЦ «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»  
Институт физико-технических проблем Севера имени В.П. Ларионова Сибирского отделения  
Российской академии наук, Якутск, e-mail: nna0848@mail.ru*

В бассейне р. Пеледуй расположен комплекс по добыче и переработке нефти и газа на базе крупного Талаканского нефтегазоконденсатного месторождения. Территория характеризуется особыми условиями рискованного природопользования, среди которых основным является наличие криолитозоны, обусловившее слабую устойчивость ландшафтов к техногенным воздействиям. Целью исследования явилась экологическая оценка ландшафтов, в частности оценка степени устойчивости ландшафтов и их антропогенной преобразованности. Для этого были использованы методика покомпонентного влияния ведущих мерзлотных характеристик на снижение устойчивости ландшафта, а также метод средневзвешенного балла. В качестве показателей оценки устойчивости были приняты мерзлотно-литогенные и биоклиматические характеристики ландшафтов. В результате определено, что основные ландшафтообразующие факторы обусловили схожие условия теплообеспеченности и увлажнения растительности ландшафтов, обеспечившие среднюю степень их устойчивости. Разброс ландшафтов с различной устойчивостью обусловлен преимущественно локальными мерзлотными условиями. Для оценивания антропогенной нарушенности был определен показатель преобразованности ландшафтов, возрастающий по мере увеличения степени хозяйственного воздействия на них. Выявлено, что воздействие нефтегазового комплекса на природную среду носит очаговый характер и антропогенная преобразованность ландшафтов бассейна р. Пеледуй является невысокой.

**Ключевые слова:** бассейн р. Пеледуй, нефтегазодобывающий комплекс, ландшафты, устойчивость, нарушенность

*Работа выполнена в рамках проекта государственного задания FWRS-2024-0031 «Комплексные исследования приоритетов развития энергетики Республики Саха (Якутия) с учетом влияния на окружающую среду и разработка способов, методов повышения энергетической эффективности и надежности локальных энергетических систем в труднодоступных изолированных территориях Севера и Арктики».*

## ENVIRONMENTAL ASSESSMENT OF LANDSCAPES OF THE PELEDUY RIVER BASIN IN THE AREA OF ACTIVITIES OF THE TALAKAN OIL AND GAS PRODUCTION COMPLEX

Nikolaeva N.A., Pinigin D.D.

*Yakut Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences  
“Institute of Physical and Technical Problems of the North named after V.P. Larionov,  
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, e-mail: nna0848@mail.ru*

In the Peleduy River basin there is a complex for the extraction and processing of oil and gas based on the large Talakan oil and gas condensate field. The territory is characterized by special conditions of risky nature management, among which the main one is the presence of a cryolithozone, which has caused the weak resistance of landscapes to man-made impacts. The aim of the study was the ecological assessment of landscapes, in particular, the assessment of the degree of stability of landscapes and their anthropogenic transformation. For this purpose, the method of component-wise influence of leading permafrost characteristics on the reduction of landscape stability, as well as the weighted average score method, were used. The indicators of permafrost-lithogenic and bioclimatic conditions of landscape functioning were adopted as indicators for assessing sustainability. As a result, it was determined that the main landscape-forming factors determined similar conditions of heat supply and moisture of landscape vegetation, which ensured an average degree of their stability. The range of landscapes with different stability is determined mainly by local permafrost conditions. To assess anthropogenic disturbance, an indicator of landscape transformation was determined, increasing as the degree of economic impact on them increases. It was revealed that the impact of the oil and gas complex on the natural environment is focal in nature and the anthropogenic transformation of the landscapes of the Peleduy River basin is low.

**Keywords:** Peleduy River Basin, oil and gas production complex, landscapes, sustainability, anthropogenic disturbance

*The work was carried out within the framework of the state assignment project FWRS-2024-0031 “Comprehensive studies of priorities for the development of energy in the Republic of Sakha (Yakutia), taking into account the impact on the environment and the development of methods and techniques for increasing the energy efficiency and reliability of local energy systems in hard-to-reach isolated areas of the North and the Arctic”.*

### Введение

Бассейн р. Пеледуй является крупным левым притоком в среднем течении р. Лены в юго-западной части Республики Саха (Якутия). Река протекает в пределах Приленского структурно-денудационного плато Среднесибирского плоскогорья в области распространения прерывистых многолетне-мерзлых пород. На территории расположен производственный комплекс ПАО «Сургутнефтегаз», являющийся одним из основных центров добычи нефти и газа, который создан на базе Талаканского нефтегазоконденсатного месторождения. Крупнейшее месторождение расположено на Непско-Пеледуйском своде северо-восточного склона Непско-Ботуобинской области, которое отличается уникально высокой плотностью ресурсов углеводородов и является одним из наиболее богатых на Сибирской платформе [1, 2]. Комплекс расположен вблизи магистрального газопровода «Сила Сибири» и нефтепровода «Восточная Сибирь – Тихий океан». С 2012 г. нефть и газ стали экспортироваться в страны Азиатско-Тихоокеанского региона, что в перспективе связано с экспортной ориентированностью на Китай [3], являющийся одним из крупнейших мировых потребителей, что в современных условиях имеет огромное экономическое и стратегическое значение для России.

Горнодобывающее производство в условиях Севера неизменно сопровождается техногенной нагрузкой на мерзлотные ландшафты, отличающиеся различной степенью устойчивости, что дает основание для экологической оценки воздействия промышленного освоения на состояние природной среды с различных сторон, в том числе оценки степени устойчивости и антропогенной преобразованности ландшафтов.

**Цель исследования** – оценка устойчивости и антропогенной преобразованности ландшафтов в зоне деятельности Талаканского нефтегазодобывающего комплекса в бассейне р. Пеледуй.

### Материалы и методы исследования

Теоретическим обоснованием изучения ландшафтно-экологических особенностей территории явились принципы геоэкологического подхода, обеспечивающие комплексное изучение связей между природными и техногенными объектами. Основой работы послужили геосистемный [4, с. 62] и геоэкологический [5; 6] методы исследования. Для оценки устойчивости ландшафтов применен оценочный метод покомпонент-

ного анализа влияния основных мерзлотных и биогидроклиматических факторов на снижение устойчивости ландшафтов [7], геоинформационный метод исследования [8] и Мерзлотно-ландшафтная карта Республики Саха (Якутия) [9].

### Результаты исследования и их обсуждение

Природные условия территории предопределены расположением в пределах Приленского среднетаежного пластового плато, характеризующегося холмисто-увалистым рельефом с вкраплениями плоских равнинных участков [10].

Ландшафты исследуемой территории по мерзлотно-ландшафтному районированию Якутской АССР относятся к физико-географической стране Средняя Сибирь Нью-Олекминской увалистой провинции [11].

Фрагмент Мерзлотно-ландшафтной карты Республики Саха (Якутия) [9] представляет карту-схему ландшафтов бассейна р. Пеледуй (с отображением трассы нефтепровода ВСТО) в масштабе 1: 2 500 000 (рисунок).



*Карта-схема ландшафтов территории бассейна р. Пеледуй: 1а – лиственничные леса с примесью сосны и ели пологосклоновые делювиально-солифлюкционные; 1б – лиственничные редины пологосклоновые делювиально-солифлюкционные; 2а – лиственничные леса с примесью кедра и ели на приводораздельных элювиальных пространствах; 2б – сосново-лиственничные леса приводораздельные элювиальные; 3 – мелкодолинные лиственничные леса с елью и сосной*

Оценка устойчивости мерзлотных ландшафтов основывается на потенциальной возможности развития криогенных дефор-

маций грунта, в связи с чем ее можно оценить по ряду мерзлотных характеристик [12]. Наиболее репрезентативными являются льдистость и температура мерзлых толщ, то есть чем выше температура и сильнее льдистость мерзлых пород, тем неустойчивее данный ландшафт, и, наоборот, чем ниже температура пород и слабее льдистость, тем устойчивее данная территория [13]. Также ландшафтообразующим фактором являются биогидроклиматические показатели, обеспечивающие природные комплексы условиями увлажнения и теплообеспеченности. Характеристики мерзлотных показателей получены по Мерзлотно-ландшафт-

ной карте РС (Я) 2018 г. [9], биогидроклиматические – по Пояснительной записке к Мерзлотно-ландшафтной карте РС (Я) [11, с. 12] и приведены в табл. 1, 2.

Разработана шкала соответствия степени устойчивости оценочным баллам, по которой устойчивыми являются ландшафты с 15 и менее баллами; средне- и слабоустойчивыми – от 16 до 17 баллов; неустойчивыми с 18 и более баллами. Интегральное влияние учитываемых показателей каждого ландшафта характеризует степень его устойчивости. В результате нами получена оценка устойчивости ландшафтов территории бассейна р. Пеледуй (табл. 3).

Таблица 1

Мерзлотные и биогидроклиматические показатели ландшафтных провинций территории бассейна р. Пеледуй

Обозначения ландшафтов	Мощность (стс/смс), м	Температура мерзлых пород, °С	Объемная льдистость пород, доли ед.	Характер распространения мерзлых пород	Запасы фитомассы, ц/га	Теплообеспеченность, град	Индекс сухости, ккал, см <sup>2</sup> /год
1а	1,6–2,0	-0,2...-1	0,2–0,4 (0,6)	прерывистый	1200–1500	1200–1400	1,0–1,5
1б	1,0–1,5	-1...-2	0,2–0,4 (0,6)	прерывистый	1200–1500	1200–1400	1,0–1,5
2а	2,0–3,0	0...-1	до 0,2...0,2–0,4	прерывистый	1200–1500	1200–1400	1,0–1,5
2б	2,5–3,5	0...1	до 0,2...0,2–0,4	прерывистый	1200–1500	1200–1400	1,0–1,5
3	1,5–2,0	0,5...-1	0,2 – 0,4	прерывистый	1200–1500	1200–1400	0,5–1,0

Таблица 2

Оценка влияния мерзлотных и биоклиматических условий на снижение устойчивости ландшафтов территории бассейна р. Пеледуй

Геокриологические и биоклиматические условия	Оценка влияния в баллах			
	1 балл устойчивые	2 балла среднеустойчивые	3 балла слабоустойчивые	4 балла неустойчивые
Мощность сезонно-талого (стс) и сезонно-мерзлого (смс) слоев, м	2,0–3,0	1,5–2,5	1,0–2,0	менее 1,0
Температура грунтов, °С	от -5 °С и ниже	от -5 до -2°	от -2 до -1°	от -1° до +1°
Льдистость отложений (объемная), отн. ед.	0,1–0,2	0,2–0,4	0,4–0,6	0,6 и более
Характер распространения многолетнемерзлых пород	сплошной	сплошной с подрусловыми таликами	прерывистый	островной
Запасы фитомассы, ц/га	1200–2000	400–1000	330 –720	20–130
Теплообеспеченность, град.	теплые, более 1600	умеренно теплые, 1200–1600	умеренно холодные, 700–1200	холодные, менее 700
Индекс сухости, ккал.см <sup>2</sup> /год	влажные 0,5–1,0	умеренно влажные 1,0-1,5	недостаточно влажные 1,5–2,5	избыточно влажные 0,5

Источник: составлено авторами на основе таблиц из [11; 14].

Таблица 3

Оценка степени устойчивости ландшафтов территории бассейна р. Пеледуй (сопоставление на 2018 г.)

Тип местности	Мощность стс/смс, м	Температура пород, °С	Объемная льдистость пород, %	Характер распространения мерзлоты	Запасы фитомассы, ц/га	Теплообеспеченность, °С	Индекс сухости, ккал. см <sup>2</sup> /год	Сумма баллов
1а	2	3	4	3	1	2	2	17
1б	2	3	4	3	1	2	2	17
2а	1	4	2	3	1	2	2	15
2б	1	4	2	3	1	2	2	15
3	3	4	4	3	1	2	1	18

Расположение исследуемых ландшафтов на территории плато с небольшой амплитудой высот, идентичные геоморфологические и стратиграфические условия обусловили схожие условия теплообеспеченности и увлажнения лесной растительности, обеспечившие в целом среднюю степень их устойчивости к техногенным нарушениям. Разброс ландшафтов с различной устойчивостью обусловлен преимущественно локальными мерзлотными условиями. Наиболее устойчивыми явились элювиальные ландшафты, поросшие лиственничными и сосново-лиственничными лесами на междуречных и приводораздельных участках; менее устойчивыми – пологосклонные ландшафты с лиственничными лесами и рединами делювиально-солифлюкционные [15]; мелководинные ландшафты на малых реках определены как наименее устойчивые. Таким образом, ландшафты бассейна р. Пеледуй в целом обладают средней степенью устойчивости.

Воздействие комплексов по добыче и переработке минерально-сырьевых ресурсов на природную среду приводит к нарушению всех ее взаимосвязанных компонентов. Методически антропогенное изменение ландшафтов оценивается авторами от изменений различных компонентов природной среды до изменений площадей ландшафтов в целом [6; 16; 17].

В труднодоступных отдаленных северных территориях в первом приближении возможно оценивание антропогенной нарушенности ландшафтов по территориальному признаку, то есть по объему изъятия

вещества основных компонентов, выраженной в процентной доле площади каждого вида хозяйственного использования от общей площади территории [5]. Для этого необходимо выявить структуру хозяйственного использования земель, обусловленную направленностью и видами хозяйственной деятельности региона. В связи с этим на территории бассейна р. Пеледуй выделены следующие виды использования земель: промышленные земли добычи и переработки нефтегазовых ресурсов, транспорта, энергетики; населенных пунктов, вырубок и геологоразведочных работ; земли охотничьего и пушного промысла, лесозаготовок; земли особо охраняемых природных территорий (ООПТ).

Комплексной характеристикой измененности земель исследуемой территории может явиться показатель антропогенной преобразованности территории [5; 6]. Виды используемых земель были ранжированы по степени их нарушения путем присвоения баллов преобразованности ландшафта (от 1 до 5), возрастающих по мере увеличения степени хозяйственного воздействия и количества нарушаемых компонентов природы. В результате виды использования земель объединены в четыре группы по степеням нарушенности: 1) сильной степени (5 баллов), куда вошли земли промышленного освоения; 2) умеренной степени (4 балла) – сельтба, вырубки, геологоразведка; 3) слабой степени (2 балла) – лесопокрытые земли, используемые под промыслы, вырубки, лесозаготовку; 4) практически неизменные земли (1 балл) зоны ООПТ.

Таблица 4

Показатели антропогенной преобразованности ландшафтов  
видами использования земель (данные на 2024 г.)

Виды использования земель	Балл антропогенной преобразованности, г	Площади видов использования земель, S <sub>i</sub> , км <sup>2</sup>	Доли площадей земель от общей площади, %	Антропогенная преобразованность ландшафтов, V <sub>ан</sub>
Промышленная зона, дороги, аэропорт	5	122,92	3,24	16,2
Селитьба, геологические изыскания, вырубки	4	7,35	0,19	0,76
Охотничий и рыболовный промыслы, лесозаготовка, сейсмопрофили	2	2812,76	74,2	148,4
Особо охраняемая природоохранная территория	1	848,01	22,37	22,37
Общая площадь территории		3791,04		

Количественная оценка степени антропогенной преобразованности (АП) ландшафтов проведена при помощи метода средневзвешенного балла [5; 6], через отношение суммарного количества измененных антропогенным воздействием земель с присвоенными баллами к общей площади территории по формуле

$$\bar{k}_i = \frac{\sum_{j=1}^n k_{ij} S_{ij}}{S_i},$$

где  $\bar{k}_i$  – средневзвешенный коэффициент антропогенной преобразованности земель;  $k_{ij}$  – коэффициент АП земель в пределах j-й, соответствующей виду использования, части i-го ландшафтного контура; n – количество видов использования земель;  $S_{ij}$  – доля j-части от площади i-го ландшафтного контура;  $S_i$  – общая площадь i-го ландшафтного контура [6].

В табл. 4 даны сведения о территориальном распределении видов использования земель. Данные по площадям видов использования территории получены методом ГИС-технологий и оценки материалов дистанционного зондирования.

Результаты показали, что наибольшее значение антропогенного нарушения имеют лесные земли, нарушенные геологическими изысканиями, лесозаготовкой с заложением сейсмопрофилей, вырубками, охотничьим и рыболовным промыслами, которые, несмотря на невысокую антропогенную нагрузку (2 балла), охватывают более 70%

от площади всей территории исследования. Земли промышленности с наибольшим баллом антропогенной нарушенности и площадью, занимающей немногим более 3% от общей площади, имеют низкое значение показателя антропогенного нарушения. Наименьшим показателем обладают земли населенных пунктов, геологоразведочных работ и вырубок. Таким образом, степень антропогенной преобразованности ландшафтов бассейна р. Пеледуй является невысокой.

#### Заключение

Оценка степени устойчивости ландшафтов бассейна р. Пеледуй в зоне воздействия нефтегазодобывающего комплекса показала, что исследуемые ландшафты обладают средней степенью устойчивости. Наибольшей устойчивостью характеризуются элювиальные среднетаежные ландшафты междуречных и приводораздельных участков; меньшей – пологосклонные лесные и редколесные ландшафты делювиально-солифлюкционные; мелкодолинные ландшафты малых рек и ручьев оценены как наименее устойчивые к антропогенному воздействию.

Оценка антропогенной преобразованности различных видов землепользования изучаемой территории показала, что степень антропогенного преобразования ландшафтов бассейна р. Пеледуй является невысокой, что обусловлено отдаленностью территории, суровостью климата, низкой плотностью населения, а также тем, что воздействие нефтегазового комплекса на природную среду носит очаговый характер.

Список литературы

1. Рудых И.В. Углеродородный потенциал республики Саха (Якутия) // Успехи современного естествознания. 2022. № 10. С. 81–87. DOI: 10.17513/use.37912.
2. Никифорова В.В. Ресурсный потенциал нефтегазового комплекса Республики Саха (Якутия) и перспективы его развития // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. Серия: Экономика. Социология. Культурология. 2023. № 4. С. 8–17. DOI: 10.25587/2587-8778-2023-4-8-17.
3. Слепцова М.И., Ситников В.С., Севостьянова Р.Ф. Прогнозные ресурсы углеводородов и их освоение на северных территориях Якутии // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2018. Т. 13. № 4. С. 9. DOI: 10.17353/2070-5379/44\_2018.
4. Сочава В.Б. Проблемы физической географии и геоботаники. Избранные труды. Новосибирск: Наука, 1986. 344 с. EDN: RZIXFV.
5. Кочуров Б.И., Марунич Н.А., Хазиахметова Ю.А., Краснов Е.В. Экологически сбалансированная структура земель и энергоэффективность ведения лесного хозяйства в Приднестровье // География и природные ресурсы. 2017. № 4. С. 197–202. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2017-4(197-202).
6. Платонова С.Г., Стрельникова Т.О., Скрипко В.В., Адам А.А., Цимбалей Ю.М. Геоэкологическая оценка районов угледобычи на примере Новокузнецкого района Кемеровской области // География и природные ресурсы. 2019. № 1. С. 156–16. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2019-1(156-167).
7. Шполянская Н.А., Зотова Л.И. Карта устойчивости ландшафтов криолитозоны Западной Сибири // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 1994. № 1. С. 56–65. URL: <https://vestnik5.geogr.msu.ru/jour/issue/archive> (дата обращения: 10.06.2025).
8. Николаева Н.А., Пинигин Д.Д. Антропогенное изменение ландшафтов зоны освоения Эльгинского каменноугольного месторождения // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18. № 2. С. 159–163. EDN: WKPI7Z.
9. Мерзлотно-ландшафтная карта Республики Саха (Якутия). Масштаб 1 : 1 500 000 / Шепелев В.В., Григорьев М.Н., Федоров А.Н., Торговкин Я.И., Варламов С.П.; гл. ред. М.Н. Железняк. 2018. 2 л. [Электронный ресурс]. URL: <https://mpi.ysn.ru/images/mlk20182.pdf> (дата обращения: 10.06.2025).
10. Чикидов И.И. Характеристика лесного покрова западной части Ленского района Республики Саха (Якутия) // Наука и образование. 2016. № 3 С. 101–107. EDN: WYNFZP.
11. Федоров А.Н., Ботулу Т.А., Варламов С.П., Васильев И.С., Грибанова С.П., Дорофеев И.В., Климовский И.В., Самсонова В.В., Соловьев П.А. Мерзлотно-ландшафты Якутии: Пояснительная записка к «Мерзлотно-ландшафтной карте Якутской АССР». 1989. 170 с. EDN: RVILMP.
12. Николаева Н.А., Пинигин Д.Д. К вопросу об устойчивости природных комплексов зоны освоения Эльгинского каменноугольного месторождения // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18. № 2–2. С. 457–461. EDN: WZTWKV.
13. Калининчева С.В. Оценка устойчивости мерзлотных ландшафтов Восточной Сибири (на примере Якутии) // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. Серия: Науки о Земле. 2024. № 3 (35). С. 51–59. DOI: 10.25587/2587-8751-2024-3-51-59.
14. Васильев И.С., Федоров А.Н., Варламов С.П., Торговкин Я.И., Васильев А.И., Шестакова А.А. Устойчивость криогенных ландшафтов на северном участке трассы железной дороги Якутии // Наука и образование. 2009. № 2. С. 4–9. EDN: KPAUEF.
15. Николаева Н.А., Пинигин Д.Д. Оценка устойчивости ландшафтов территории освоения Эльгинского каменноугольного месторождения // География и природные ресурсы. 2019. № 1. С. 45–51. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2019-1(45-51).
16. Широкова В.А., Мулин М.О. Оценка антропогенной нагрузки на земельный фонд водосборной территории реки Цимла на основе расчета эколого-хозяйственного баланса ее территории // Международный сельскохозяйственный журнал. 2022. Т. 65. № 2 (386). С. 152–156. DOI: 10.55186/25876740\_2022\_65\_2\_152.
17. Помазкова Н.В., Фалейчик Л.М. Оценка эколого-хозяйственного баланса территории Забайкальского края // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. 2018. № 2. С. 5–15. EDN: XQVZPN.

## ВЛИЯНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА КАЧЕСТВО ЖИЗНИ НАСЕЛЕНИЯ В МУНИЦИПАЛИТЕТАХ НОВГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ

<sup>1,2</sup>Юзбеков М.А., <sup>3</sup>Юзбеков А.К.

<sup>1</sup>ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», Москва, e-mail: uma77@mail.ru;

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого»,  
Великий Новгород;

<sup>3</sup>ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Москва

Статья посвящена оценке влияния экологических условий проживания на качество жизни населения в муниципалитетах Новгородской области. В процессе исследования на базе данных официальной статистики применялись методы: статистико-экономический, абстрактно-логический и системный анализ, ранжирование. По результатам исследования региональных тенденций загрязнения атмосферного воздуха и его воздействий на показатели естественного движения населения и состояние здоровья обосновано критическое состояние демографической ситуации в регионе (низкий коэффициент рождаемости, высокие коэффициенты смертности и естественной убыли населения, высокий уровень заболеваемости). Установлено, что в условиях ухудшения экологической ситуации объемы расходов, направляемых на экологические цели, недостаточны. Методом корреляционного анализа на муниципальном уровне подтверждены связи между экологическими условиями проживания и смертностью населения, заболеваемостью органов дыхания взрослых и детей. На основе разработанного индекса экологических условий проживания классифицированы муниципальные образования в регионе; рассчитаны коэффициенты влияния экологического фактора в общем воздействии социально-эколого-экономических показателей на качество жизни населения и определены экологически неблагоприятные муниципалитеты. Результаты проведенной работы могут быть использованы региональными и муниципальными органами управления природоохранной деятельностью при принятии решений по улучшению экологической ситуации в муниципальных образованиях.

**Ключевые слова:** население, экологические условия, демографические показатели, здоровье, качество жизни, муниципальное образование

## INFLUENCE OF ENVIRONMENTAL CONDITIONS ON THE QUALITY OF LIFE OF THE POPULATION IN THE MUNICIPALITIES OF THE NOVGOROD REGION

<sup>1,2</sup>Yuzbekov M.A., <sup>3</sup>Yuzbekov A.K.

<sup>1</sup>Moscow Polytechnic University, Moscow, e-mail: uma77@mail.ru;

<sup>2</sup>Yaroslav the Wise Novgorod State University, Veliky Novgorod;

<sup>3</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow

The article is devoted to the assessment of the impact of environmental living conditions on the quality of life of the population in the municipalities of the Novgorod region. In the process of the study on the basis of official statistics the following methods were used: statistical-economic, abstract-logical and system analysis, ranking. Based on the results of the study of regional trends in air pollution and its impact on the indicators of natural movement of the population and health status, the critical state of the demographic situation in the region is substantiated (low birth rate, high mortality rates and natural population decline, high morbidity). It was established that in the conditions of deterioration of the environmental situation, the volume of expenditures directed to environmental goals is insufficient. The method of correlation analysis at the municipal level confirmed the links between environmental living conditions and mortality of the population, respiratory morbidity in adults and children. Based on the developed index of environmental living conditions, municipalities in the region are classified; coefficients of the influence of the environmental factor in the general impact of socio-ecological-economic indicators on the quality of life of the population are calculated and ecologically unfavorable municipalities are identified. The results of the work carried out can be used by regional and municipal environmental management bodies when making decisions to improve the environmental situation in municipalities.

**Keywords:** population, environmental conditions, demographic indicators, health, quality of life, municipality

### Введение

В последние годы экономическое развитие в России, как и во всем мире, характеризовалось усилением экологических нарушений. В связи с ухудшением состояния атмосферы наблюдалось увеличение эколо-

гически обусловленных заболеваний и повышенная смертность, что способствовало сложившейся неблагоприятной демографической ситуации и, как следствие, снижению качества жизни населения в регионах Российской Федерации [1]. Принимаемые

меры по улучшению экологических условий не обеспечили должный уровень состояния атмосферного воздуха. Так, выделяемые на экологические цели затраты свидетельствуют о недофинансировании природоохранной деятельности (в 2023 г. из федерального бюджета РФ на охрану окружающей среды было направлено лишь 0,46% от общих расходов) [2].

Экологические проблемы характерны для многих регионов РФ, в том числе для Новгородской области, в которой на фоне увеличения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу сложилась критическая демографическая ситуация: в рейтинге регионов по смертности населения и ожидаемой продолжительности жизни область занимала последние места. В данных условиях, в соответствии с государственной политикой в области экологического развития России [3], исследование влияния экологического фактора на характеристики качества жизни (заболеваемость, демографические показатели) является актуальным, поскольку позволяет оценить последствия этого влияния и выработать рекомендации в области улучшения экологических условий.

В настоящее время проводится достаточное количество исследований относительно связи экологических условий и условий проживания населения в разрезе российских регионов. Однако при региональном уровне исследования происходит усреднение показателей для разных частей территории региона, отличающихся по благополучию в экологическом отношении, что приводит к недостаточно точным выводам (например, занижению тесноты связей между показателями [4]). Это свидетельствует о целесообразности при исследовании переходить к анализу на уровне муниципальных образований. В данной статье проведен анализ влияния экологического фактора на демографические показатели и состояние здоровья населения в муниципальных образованиях Новгородской области, а также на основе индекса экологических условий проживания выполнена сравнительная оценка позиций муниципалитетов и рассчитаны коэффициенты влияния экологического фактора в общем воздействии социально-эколого-экономических показателей на качество жизни.

**Цель исследования** – оценка влияния экологических условий проживания на качество жизни населения в муниципальных образованиях Новгородской области.

## Материалы и методы исследования

Источником информации для исследования послужили данные Федеральной службы государственной статистики (Росстат), базы данных муниципальных образований.

В статье реализуется авторская разработка оценки влияния экологического фактора на условия проживания населения в муниципальных образованиях на основе индексов качества жизни, построенных методом ранжирования ограниченного количества (14) социально-экономических и экологических показателей. Показатели объединены в три группы, включая демографическую ситуацию и здоровье населения, социально-экономическое развитие и экологические условия. Для оценки экологических условий проживания использованы количественные характеристики выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от стационарных источников и автотранспорта, затраты на атмосферноохранную деятельность. Ранжирование муниципалитетов выполняется по каждому показателю, при этом принимается во внимание вектор его воздействия на качество жизни населения: если влияние показателя положительное, то большему числовому значению присваивается большее значение рангового места (баллов), если влияние отрицательное – меньшее значение рангового места (баллов). Для вычисления по каждой группе частного индекса качества жизни используется среднее арифметическое значение баллов всех входящих в группу показателей. Результирующий индекс качества жизни, равный среднему геометрическому значению баллов частных индексов, определяет итоговую позицию муниципального образования. Влияние экологического фактора в общем воздействии социально-эколого-экономических показателей на качество жизни населения в муниципалитете оценивается на основе коэффициента, рассчитанного как доля баллов индекса экологических условий в общей сумме баллов частных индексов.

Путем корреляционного анализа исследуется связь между экологическими условиями и демографическими показателями и состоянием здоровья населения.

## Результаты исследования и их обсуждение

Для нормальной жизнедеятельности человека нужен воздух определенной чистоты, поэтому важнейшей характеристикой воздушного бассейна является его качество. В последнее десятилетие в Новгородской

области наблюдалась сложная экологическая обстановка. В 2023 г. поступления загрязняющих веществ в атмосферу как от всех, так и от стационарных источников, расположенных на территории региона, находились на уровне 0,4% к общероссийским показателям и составили соответственно 92 и 71 тыс. т [5]. Для региона характерно ухудшение состояния атмосферного воздуха: за 2012–2023 гг. выбросы загрязняющих веществ от стационарных источников увеличились на 58% (при среднем показателе для России 13%).

Каждый человек находится под воздействием различных факторов, которые определяют качество его жизни. По результатам исследований в европейских странах, более 73% опрошенного населения среди характеристик качества жизни на первое место поставили здоровье [6]. Во многих работах подтвержден факт зависимости состояния здоровья человека от загрязнения окружающей среды [7, с. 36; 8, с. 87; 9]. Согласно оценке ВОЗ, вклад окружающей среды в здоровье населения находится в интервале 17–20% [7, с. 11]. По мнению автора [7, с. 15], значение экологической составляющей в общем воздействии всех факторов больше – 40–60%.

Исследование структуры заболеваемости населения в РФ показало, что болезни органов дыхания занимают 1-е место. Анализ динамики заболеваемости в целом по России и в частности по Новгородской области [10] выявил, что региональные показатели выше общероссийских в среднем на 21%. В 2012–2023 гг. наблюдалась тенденция к ухудшению здоровья всего населения: доля болезней органов дыхания в общей заболеваемости увеличилась

в Новгородской области на 9,3%, в России – на 8,3% и составила соответственно 55 и 50%. По результатам регрессионного анализа, в Новгородской области 36% вариаций заболеваемости взрослого населения болезнями органов дыхания и 53% вариаций детской заболеваемости были связаны с загрязнением атмосферного воздуха [11].

Сопоставление демографических показателей в России и Новгородской области показало, что демографическая ситуация в регионе находилась в критическом состоянии, обусловленном спецификой региональных показателей, включая наиболее низкий коэффициент рождаемости (на 1,7 случая/1000 чел.), наиболее высокие коэффициенты смертности и естественной убыли населения (на 4,3 и 6,0 случая/1000 чел.) (рис. 1).

По коэффициенту смертности всего населения область в течение нескольких лет являлась одним из самых неблагоприятных регионов РФ (в 2023 г. – 81-е место). Сложившаяся динамика основных показателей естественного движения населения (увеличение коэффициента естественной убыли (на 3,3 случая/1000 чел.) при снижении коэффициентов рождаемости и смертности (соответственно на 5,1 и 1,8 случая/1000 чел.)) подтвердила негативную тенденцию демографической ситуации в регионе.

Экологические условия проживания населения являются одной из причин ухудшения демографических показателей. Путем проведения корреляционного анализа авторами выявлена зависимость общего числа умерших в Новгородской области от плотности суммарных выбросов загрязняющих веществ в атмосферу ( $R = 0,797$ ;  $p < 0,001$ ).

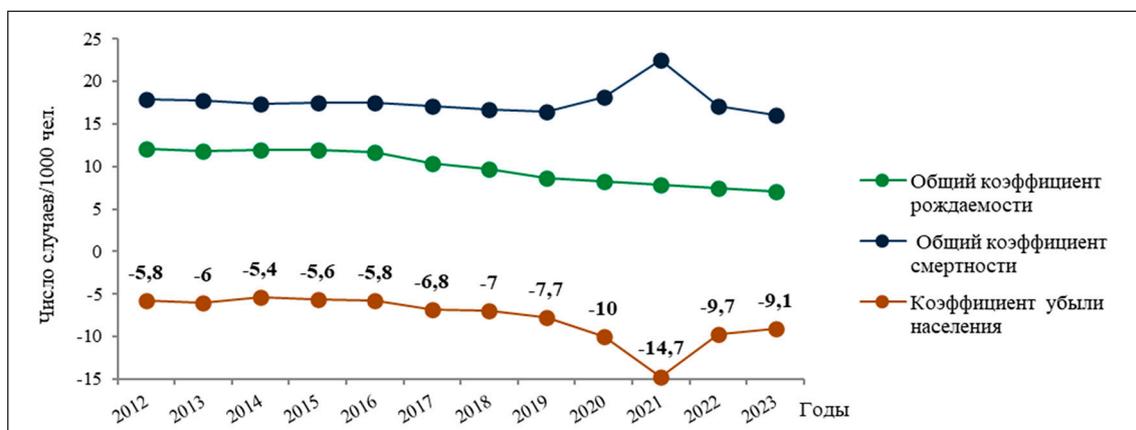


Рис. 1. Динамика показателей естественного движения населения Новгородской области  
Источник: составлено авторами на основе [10]

**Таблица 1**

Расходы на охрану окружающей среды в 2012–2021 гг.

Показатель \ Годы	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Расходы на охрану окружающей среды в РФ, млрд руб.	446	479	560	582	591	658	720	872	970	1240
Расходы на охрану окружающей среды в Новгородской области, млрд руб.	1,6	1,7	1,8	2,5	1,8	2,0	1,8	2,0	1,9	2,1

Источник: составлено и рассчитано авторами на основе [13].

**Таблица 2**

Коэффициенты корреляции между экологическими условиями проживания и показателями качества жизни населения ( $p < 0,05$ )

Район	Болезни органов дыхания, взрослые	Болезни органов дыхания, дети	Смертность общая	Район	Болезни органов дыхания, взрослые	Болезни органов дыхания, дети	Смертность общая
Батецкий	–	–	–	Окуловский	–	–	0,386
Боровичский	0,324	–	0,840	Парфинский	–	0,407	–
Валдайский	0,909	–	–	Пестовский	–	0,438	–
Волотовский	0,564	0,684	–	Поддорский	0,098	–	–
Демянский	–	0,118	–	Солецкий	0,107	0,958	–
Крестецкий	–	–	0,416	Старорусский	0,278	0,885	–
Любытинский	–	0,352	–	Хвойнинский	–	0,645	–
Маловишерский	0,925	0,567	–	Холмский	–	0,226	–
Маревский	–	0,746	–	Чудовский	0,201	0,182	–
Мошенской	0,411	0,054	0,372	Шимский	–	0,313	–
Новгородский	0,321	0,536	–	Великий Новгород	–	0,717	–

Источник: составлено и рассчитано авторами на основе [14].

Решение проблемы защиты окружающей среды от загрязнения во многом зависит от природоохранных расходов [12], изменение которых за последние годы представлено в табл.1.

В результате анализа динамики природоохранных затрат в Новгородской области выявлено, что они (в отличие от общероссийской тенденции к увеличению) изменялись неравномерно в течение периода исследований, максимальное значение отмечено в 2015 г. При этом в 2021 г. их величина увеличилась по сравнению с 2012 г. на 31% и составила 2,1 млрд руб (0,6% к ВРП). Согласно расчетам, доля региональных затрат в общем объеме общероссийских затрат уменьшилась за 10 лет в 2 раза и составила всего 0,17%. С уче-

том ухудшения экологической ситуации в регионе затрат, выделяемых на экологические цели, было недостаточно. Поэтому одним из условий для достижения должного качества окружающей среды в регионе является увеличение бюджетного финансирования природоохранной деятельности по отношению к ВРП.

Проведенное в региональном разрезе исследование подтвердило ухудшение экологических условий и их связь с заболеваемостью и смертностью населения. В связи с неравномерным распределением показателей качества жизни по территории региона, дальнейшее исследование выполнено на менее агрегированном уровне – уровне муниципальных образований (в регионе 22 муниципальных образований).

В результате корреляционных исследований влияния экологических условий (выбросов загрязняющих веществ в атмосферу) на демографические показатели и здоровье населения получены количественные характеристики тесноты связи между показателями. Как следует из табл. 2, сильная связь между экологическим фактором и заболеваемостью взрослых болезнями органов дыхания существовала в Валдайском и Маловишерском районах, заметная – в Волотовском районе.

Связь между заболеваемостью детей болезнями органов дыхания и загрязнением окружающей среды установлена в 16 районах из 22, при этом сильная по тесноте связь между показателями отмечена в Солецком, Старорусском и Маревском районах и Великом Новгороде; заметная – в Волотовском, Маловишерском, Новгородском и Хвойнинском районах. Только в четырех районах выявлена зависимость численности умерших от всех болезней от экологических условий проживания: в Боровичском районе связь по тесноте была сильной; в трех районах – умеренной. Очевидно, что слабая связь или ее отсутствие между показателями свидетельствует о большем воздействии других факторов, которые не были включены в исследование.

В работе, в соответствии с разработанным алгоритмом [15], проведено ранжирование муниципальных образований по экологическим условиям проживания и оценена степень влияния экологического фактора в общем воздействии показателей на качество жизни населения.

*Первый шаг:* по результатам проведенного анализа социально-эколого-экономических показателей качества жизни (с учетом их преимуществ и недостатков) отобрано 14 объективных показателей, которые сгруппированы по трем направлениям (табл. 3).

Существующие российские рейтинги качества жизни в основном составлены на базе большого количества показателей: например, агентство «РИА Рейтинг» при рейтинге регионов России использует 66 показателей, Агентство стратегических инициатив (АСИ) – 161 показатель. Очевидно, что при проведении исследований на муниципальном уровне такое количество показателей является избыточным. Показатели, учитываемые в данной работе, достаточно полно характеризуют основные стороны качества жизни в муниципалитетах и дают возможность решать экологические проблемы. При этом расчеты с помощью ограниченного числа показателей не требуют больших затрат времени и средств.

*Второй шаг:* выполнено ранжирование муниципальных образований по каждому показателю и рассчитаны частные индексы качества жизни для каждой группы. В расчетах использовали средние значения показателей за 2021–2023 гг. Рейтинговые баллы по группе экологических условий проживания приведены в табл. 4.

Принимая во внимание различия муниципалитетов по исследуемым показателям, для сравнительного анализа были отобраны муниципалитеты, занимающие три первые и три последние позиции в рейтинге.

Таблица 3

Социально-эколого-экономические показатели качества жизни населения

Наименование группы показателей		
Демографическая ситуация и здоровье населения	Социально-экономическое развитие	Экологические условия проживания
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Коэффициент рождаемости на 1000 чел.</li> <li>• Коэффициент смертности на 1000 чел.</li> <li>• Общая заболеваемость на 1000 чел.</li> <li>• Болезни органов системы кровообращения на 1000 чел.</li> <li>• Болезни органов дыхания взрослых на 1000 чел.</li> <li>• Болезни органов дыхания детей на 1000 чел.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Среднемесячная заработная плата работников в экономике</li> <li>• Общая площадь жилых помещений на одного жителя</li> <li>• Обеспеченность населения врачами на 10000 чел.</li> <li>• Расходы на образование на одного жителя</li> <li>• Расходы на здравоохранение на одного жителя</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу стационарными источниками на единицу площади муниципалитета</li> <li>• Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу автотранспортом на единицу площади муниципалитета</li> <li>• Затраты на охрану атмосферы на единицу выбросов</li> </ul>

Источник: составлено и рассчитано авторами на основе [14].

Таблица 4

Баллы по показателям экологических условий проживания

Район	Затраты на охрану атмосферы	Плотность выбросов от стационарных источников	Плотность выбросов от автотранспорта	Индекс экологических условий проживания
Батецкий	1	16	17	11,3
Боровичский	20	4	2	8,7
Валдайский	17	12	6	11,7
Волотовский	4	2	18	8,0
Демянский	9	14	16	13,0
Крестецкий	13	3	11	9,0
Любытинский	6	17	21	14,7
Маловишерский	14	20	13	15,7
Маревский	7	19	19	15,0
Мошенокский	2	18	20	13,3
Новгородский	19	9	5	11,0
Окуловский	16	5	7	9,3
Парфинский	10	8	10	9,3
Пестовский	12	6	4	7,3
Поддорский	2	22	22	15,3
Солецкий	8	7	9	8,0
Старорусский	18	15	3	12,0
Хвойнинский	11	11	14	12,0
Холмский	5	21	15	13,7
Чудовский	21	10	8	13,0
Шимский	15	13	12	13,3
Великий Новгород	22	1	1	8,0

Источник: составлено и рассчитано авторами на основе [14].

Наиболее благоприятные условия проживания населения с точки зрения экологии наблюдались на территории Маловишерского (низкая плотность выбросов от стационарных источников), Поддорского (наименьшие показатели плотности выбросов от стационарных источников и автотранспорта) и Маревского (низкие показатели выбросов от всех источников) районов. Для этих районов индекс экологических условий проживания соответственно составил 15,7; 15,3 и 15,0 балла. Наиболее неблагоприятными районами являлись Пестовский (высокая плотность суммарных выбросов), Волотовский (высокая плотность выбросов от стационарных источников и низкие экологические затраты), Солецкий (загрязнение воздуха всеми источниками при низком уровне экологических затрат) районы и Великий Новго-

род (максимальная плотность суммарных выбросов). В Пестовском районе индекс экологических условий составил 7,3 балла, в остальных районах – 8,0 балла.

Классификация муниципальных образований по степени остроты экологических условий проживания может быть использована региональными органами управления природоохранной деятельностью при принятии решений по улучшению природной среды в неблагоприятных муниципалитетах; при этом выбор муниципальных образований осуществляется, исходя из минимальных значений экологического индекса.

*Третий шаг:* составлен рейтинг муниципальных образований по качеству жизни населения. Итоговая позиция муниципального образования определена на основе результирующего индекса (табл. 5).

Таблица 5

## Рейтинг муниципальных образований по качеству жизни

Район	Позиция муниципального образования по частным индексам качества жизни			Итоговый рейтинг муниципальных образований по качеству жизни	
	Демографическая ситуация и здоровье	Социально-экономическое развитие	Экологические условия	Рейтинговый балл	Место
Батецкий	6	16	13	12,103	8
Боровичский	21	15	18	8,613	20
Валдайский	13	12	12	11,015	15
Волотовский	4	19	19	10,245	17
Демянский	5	17	8	12,632	4
Крестецкий	2	12	17	12,197	6
Любытинский	15	5	4	12,163	7
Маловишерский	22	4	1	11,494	12
Маревский	10	1	3	14,403	1
Мошенской	8	7	6	12,995	2
Новгородский	3	20	14	10,155	18
Окуловский	14	6	15	10,464	16
Парфинский	12	22	15	7,710	21
Пестовский	1	2	22	12,975	3
Поддорский	17	8	2	11,675	11
Солецкий	19	21	19	6,929	22
Старорусский	10	10	10	12,000	9
Хвойнинский	15	2	10	11,774	10
Холмский	17	9	5	11,077	14
Чудовский	9	18	8	11,424	13
Шимский	7	14	6	12,608	5
Великий Новгород	20	11	19	8,742	19

Источник: составлено и рассчитано авторами на основе [14].

При анализе рейтинговых баллов выявлено существенное неравенство муниципальных образований по качеству жизни населения. Позиция муниципалитета в большинстве случаев определялась сочетанием как более высоких, так и низких позиций частных индексов. Самыми лучшими по условиям проживания являлись Маревский, Мошенской и Пестовский районы. Следует отметить, что неблагоприятные экологические условия в Пестовском районе (22-е место в рейтинге муниципалитетов) не повлияли на итоговый показатель качества жизни благодаря лучшим позициям по другим группам показателей (1-е и 2-е место). В Маревском и Мошенском районах влияние экологической составляющей на итоговый рейтинг было позитивным: по индексу экологических условий районы занимали 3-е и 6-е место. Позиция районов,

занимающих последние места в рейтинге по качеству жизни, зависела от негативно-го влияния экологического фактора, а также от повышенной заболеваемости населения (Боровичский и Солецкий районы) и социально-экономических условий (Парфинский и Солецкий районы).

*Четвертый шаг:* количественно оценена степень влияния экологического фактора в общем воздействии социо-эколого-экономических показателей на качество жизни в муниципалитете. Оценка проведена на основе коэффициента, рассчитанного как доля баллов индекса экологических условий проживания в сумме баллов по трем группам показателей (критерием являлось значение  $\leq 33\%$ ). Согласно рис. 2, в Маловишерском и Поддорском районах вклад экологического фактора в комфортность среды проживания составлял 42%, в Пестовском районе – только 17%.

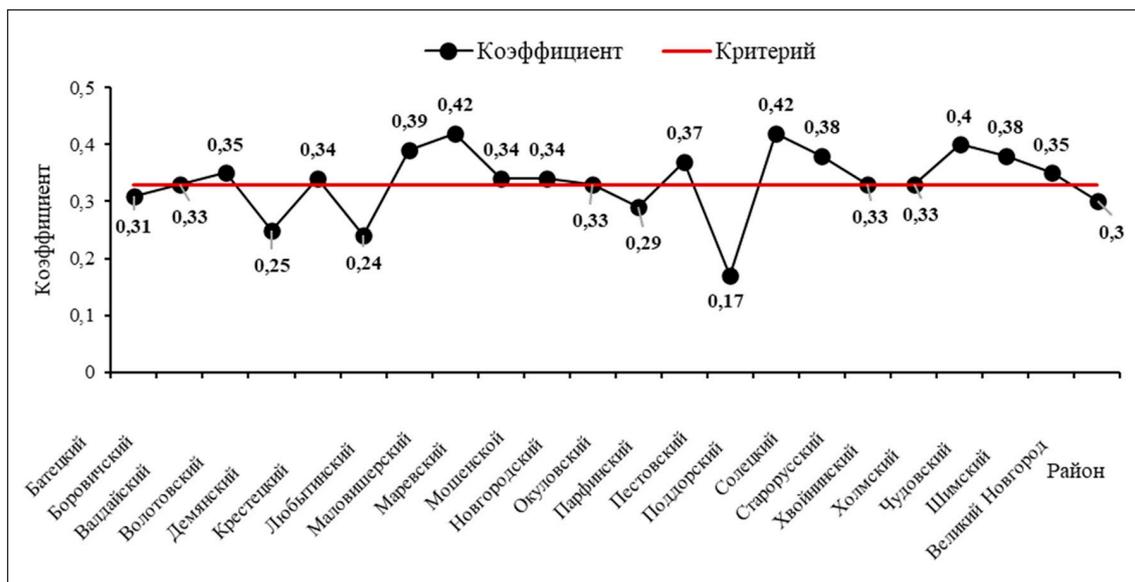


Рис. 2. Коэффициенты влияния экологических условий проживания на качество жизни  
 Источник: составлено и рассчитано авторами на основе [14]

Наибольшее негативное влияние экологических условий на благополучие населения установлено в 10 районах (коэффициент влияния  $\leq 0,33$ ), что свидетельствует о необходимости принятия мер по снижению загрязнения окружающей среды. Полученные результаты исследований могут быть учтены муниципальными органами управления охраной окружающей среды при принятии решений по улучшению экологической ситуации.

### Закключение

Результаты исследований динамики показателей загрязнения атмосферного воздуха и его влияния на демографическую ситуацию и состояние здоровья свидетельствуют о нерешенных экологических проблемах в Новгородской области. Проведенный в разрезе муниципальных образований корреляционный анализ подтвердил связи между экологическими условиями проживания населения и заболеваемостью взрослых и детей болезнями органов дыхания, общей смертностью. На основе рассчитанного индекса экологических условий проживания определены экологически неблагоприятные муниципальные образования, а также оценена степень влияния экологической составляющей в общем воздействии социально-эколого-экономических факторов на качество жизни в муниципалитетах. Полученные результаты могут быть использованы региональными и муниципальными

органами управления природоохранной деятельностью в целях обеспечения поддержки при принятии решений по улучшению экологических условий проживания населения.

### Список литературы

1. Будилова Е.В., Лагутин М.Б., Мигранова Л.А. Влияние качества городской среды на демографические показатели здоровья населения // Народонаселение. 2021. Т. 24. № 1. С. 44–53. DOI: 10.19181/population.2021.24.1.5.
2. Федеральный закон Российской Федерации от 05.12.2022 № 466-ФЗ «О федеральном бюджете на 2023 год и на плановый период 2024 и 2025 годов» [Электронный ресурс]. URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_433298/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_433298/) (дата обращения: 18.04.2025).
3. Основы государственной политики в области экологического развития Российской Федерации на период до 2030 года (утв. Президентом РФ 30.04.2012) [Электронный ресурс]. URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_129117/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_129117/) (дата обращения: 18.04.2025).
4. Рюмина Е.В. Влияние экологических условий проживания на человеческий потенциал // Региональные проблемы преобразования экономики. 2023. № 9. С. 96–103. DOI: 10.26726/1812-7096-2023-9-96-103.
5. Официальный сайт Росстата. Приложение к сборнику «Охрана окружающей среды в России 2024» (информация в разрезе субъектов Российской Федерации). [Электронный ресурс]. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13209> (дата обращения: 03.03.2025).
6. Квинт В.Л., Окрепилов В.В. Качество жизни и ценности в национальных стратегиях развития // Вестник Российской академии наук. 2014. Т. 84. № 5. С. 412–425. DOI: 10.7868/S0869587314050107.
7. Гичев Ю.П. Введение в экологическую медицину. Новосибирск: Офсет-ТМ; София. 2023. 243 с. ISBN: 978-5-85957-206-9.
8. Макоско А.А., Матешева А.В. Загрязнение атмосферы и качество жизни населения в XXI веке: угрозы и перспективы. М.: Российская академия наук. 2020. 258 с. ISBN: 978-5-907036-71-0.

9. Ревич Б.А. Риски здоровью населения в «горячих точках» от химического загрязнения Арктического макрорегиона // Проблемы прогнозирования. 2020. № 2. С. 148–157. URL: <https://ecfor.ru/publication/riski-zdorovyu-naseleniya-ot-himicheskogo-zagryazneniya-arkticheskogo-makroregiona/> (дата обращения: 18.04.2025).
10. Официальный сайт Росстата. Регионы России. Социально-экономические показатели. 2024: Статистический сборник. [Электронный ресурс]. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13204> (дата обращения: 10.03.2025).
11. Юзбеков М.А., Юзбеков А.К. Экономические последствия воздействий промышленного производства на атмосферу // Фундаментальные исследования. 2019. № 10. С. 138–143. URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=42576> (дата обращения: 18.04.2025).
12. Семенова Н.Н., Еремина О.И., Скворцова М.А. «Зеленое» финансирование в России: современное состояние и перспективы развития. Финансы: теория и практика/Finance: Theory and Practice. 2020. Т. 24. № 2. С. 39–49. DOI: 10.26794/2587-5671-2020-24-2-39-49.
13. Официальный сайт Росстата. Расходы на охрану окружающей среды и индекс физического объема природоохранных расходов. [Электронный ресурс]. URL: [https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/rashod\\_oxr\\_gos\\_sub.xls](https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/rashod_oxr_gos_sub.xls) (дата обращения: 18.04.2025).
14. Официальный сайт Росстата. База данных показателей муниципальных образований. [Электронный ресурс]. URL: <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/MUNST.htm> (дата обращения: 02.03.2025).
15. Юзбеков М.А., Юзбеков А.К. Развитие системы управления в области охраны окружающей среды // Вестник Московского университета им. С.Ю. Витте. Сер. 1: Экономика и управление. 2023. № 2 (45). С. 40–48. DOI: 10.21777/2587-554X-2023-2-40-48.

## НАУЧНЫЙ ОБЗОР

УДК 911.3

DOI

**НОВЕЙШИЕ КОНЦЕПЦИИ В ГЕОГРАФИИ  
И ТЕРРИТОРИАЛЬНОМ ПЛАНИРОВАНИИ ТРАНСПОРТА  
(НА ПРИМЕРЕ ЗАРУБЕЖНЫХ КОНЦЕПЦИЙ РАЗВИТИЯ  
ТРАНСПОРТА) И ВОЗМОЖНОСТЬ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В РОССИИ****<sup>1</sup>Волкова И.Н., <sup>2</sup>Крылов П.М., <sup>3</sup>Семина И.А., <sup>3</sup>Фоломейкина Л.Н.**<sup>1</sup>*Институт географии Российской академии наук, Москва;*<sup>2</sup>*ФГАОУ ВО «Государственный университет просвещения», Москва;*<sup>3</sup>*Национальный исследовательский Мордовский государственный университет,  
Саранск, e-mail: isemina@mail.ru*

Целью работы является рассмотрение и краткий анализ новейших зарубежных концепций в области транспорта в связи с возможностью их применения в России. Задачи работы – краткий анализ отдельных концепций в связи с возможностью их применения в географии и территориального планирования транспорта в России. К их числу авторами отнесены концепции транспортно-ориентированного развития, пятнадцатиминутного города, транспортного разрыва, автомобильной зависимости, сокращения бедности при использовании велосипеда, транзитной пустыни, транспортно-ориентированного развития городов и агломераций. Большинство рассматриваемых принципов не имеют российских аналогов и не рассматриваются в территориальном планировании и в географии транспорта в России. Концепция транспортного разрыва может считаться отдаленным аналогом российских концепций транспортной уязвимости и транспортной дискриминации населения. Для улучшения качества территориального планирования транспорта в России рекомендуется рассмотреть возможность внедрения отдельных принципов зарубежных концепций в области транспорта в российские стратегические и концептуальные документы в области градостроительства и территориального планирования. К подобным документам можно отнести концепции и стратегии транспорта муниципальных образований, генеральные планы, мастер-планы, нормативы градостроительного проектирования, программы комплексного развития транспортной инфраструктуры, схемы территориального планирования муниципальных образований и субъектов РФ.

**Ключевые слова:** концепции транспорта, территориальное планирование, география транспорта, подвижность населения, транспортное планирование

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

**THE LATEST CONCEPTS IN GEOGRAPHY AND TERRITORIAL  
PLANNING OF TRANSPORT (USING THE EXAMPLE OF FOREIGN  
CONCEPTS OF TRANSPORT DEVELOPMENT) AND THE POSSIBILITY  
OF THEIR APPLICATION IN RUSSIA****<sup>1</sup>Volkova I.N., <sup>2</sup>Krylov P.M., <sup>3</sup>Semina I.A., <sup>3</sup>Folomeykina L.N.**<sup>1</sup>*Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, Moscow;*<sup>2</sup>*State University of Education, Moscow;*<sup>3</sup>*National Research Mordovia State University named after N.P. Ogarev,  
Saransk, e-mail: isemina@mail.ru*

The purpose of the work is to review and briefly analyze the latest foreign concepts in the field of transport in connection with the possibility of their application in Russia. The objectives of the work are a brief analysis of individual concepts in connection with the possibility of their application in geography and territorial planning of transport in Russia. The authors include the concepts of transport-oriented development, the fifteen-minute city, the transport gap, car dependence, poverty reduction by using a bicycle, transit desert, transport-oriented development of cities and agglomerations. Most of the concepts under consideration have no Russian analogues and are not considered in territorial planning and in the geography of transport in Russia. The concept of the transport gap can be considered a distant analogue of the Russian concepts of transport vulnerability and transport discrimination of the population. To improve the quality of territorial transport planning in Russia, it is recommended to consider the possibility of introducing certain principles of foreign concepts in the field of transport into Russian strategic and conceptual documents in the field of urban planning and territorial planning. Such documents include concepts and strategies of transport of municipalities, master plans, master plans, standards of urban planning design, programs for the integrated development of transport infrastructure, schemes of territorial planning of municipalities and subjects of the Russian Federation.

**Keywords:** transportation concepts, territorial planning, transportation geography, population mobility, transportation planning

*The article was prepared within the framework of the topic of the state assignment of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences: «Socio-economic space of Russia in the context of global transformations: internal and external Challenges, No. 124032900015-3 (FMWS-2024–0008)».*

### Введение

Развитие транспорта на перспективу прогнозируется во всем мире, как правило, прежде всего с учетом основных направлений (трендов) в глобальной, страновой и региональной экономике. Часто учитываются прогнозы и тренды в развитии инновационных, а также цифровых технологий в области инфраструктуры, частью которой является транспорт, в логистике и потребительских предпочтениях населения, а также достижения фундаментальной науки в целом.

Рост уровня жизни и рост урбанизации населения, бурное расширение мегаполисов и повышение их значимости в социально-экономическом развитии в ближайшей перспективе очевидно приведут к существенному увеличению потребности в использовании транспорта для сокращения пространственных разрывов территории стран и экономии времени граждан. На динамику и структуру развития транспорта существенное влияние будет оказывать повышение открытости общества, а также значимости межстранового обмена и мобильности населения. Так, согласно прогнозу Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР), потребности в перевозках всеми видами транспорта в мире в целом к 2050 г. увеличатся в 4 раза. Основные социально-экономические тенденции в мире, проявившиеся в конце XX – начале XXI в., требуют значительного ускорения, повышения надежности и доступности транспортных услуг [1, с. 25; 2]. Значение транспортных услуг при этом будет зависеть от индивидуальных и массовых потребностей жителей в перемещении [3–5].

**Цель исследования** – рассмотрение и краткий анализ новейших зарубежных концепций в области транспорта в связи с возможностью их применения в России.

### Материалы и методы исследования

В основе настоящей работы лежат отчетные материалы в области транспортной инфраструктуры, а также зарубежные научные статьи и отчеты, описывающие основные зарубежные концепции в области развития транспорта за последние 15 лет. Системный анализ позволил выявить концепции в транспортном планировании для целей устойчивого развития.

### Результаты исследования и их обсуждение

Современные виды транспорта, развиваясь в условиях конкурентного рынка,

добиваются лидерства или стремятся к лидерству на транспортном рынке. Развитие городского и внегородского транспорта в современных условиях сталкивается со стремительным прогрессом в науке и технологиях транспорта людей и грузов. Современные концепции развития транспорта включают разнообразные инновационные подходы и технологии, направленные на удовлетворение все более разнообразных требований общества [6].

В первую очередь к числу таких инноваций следует отнести полностью автономные автомобили и другие транспортные средства, управляемые при физическом отсутствии водителя, то есть исключительно с помощью искусственного интеллекта. Они все активнее развиваются в ряде наиболее развитых стран, где внедряются в различные сферы экономики и жизнедеятельности населения. Такие транспортные средства способны самостоятельно принимать решения и выполнять задачи без участия человека.

Одновременно гибридные автомобили и электромобили становятся все более популярными благодаря их экологической чистоте и экономии топлива. Для них разрабатываются все новые технологии для увеличения дальности пробега и улучшения работы аккумуляторов. Большую роль они сыграют, по прогнозам, и в совершенствовании общественного транспорта будущего за счет разработки «умных маршрутов», автономных автобусов и поездов, а также цифровых платформ для удобства обслуживания пассажиров. Весьма перспективным представляется уже сегодня активное использование беспилотных летательных аппаратов в гражданской сфере, например, для доставки товаров, мониторинга окружающей среды и спасательных операций. В прогнозном развитии транспортных систем большую роль играет концепция мобильности как услуги: подход предполагает интеграцию различных видов транспорта, что позволяет пассажирам быстро выбирать оптимальный маршрут и вид транспорта, основываясь на текущих условиях и предпочтениях.

Весьма важны такие нововведения, как использование цифровых технологий и Интернета вещей для улучшения управления транспортом, отслеживания состояния транспортных средств и инфраструктуры, а также оптимизации логистических цепочек; широкое распространение альтернативных видов топлива: разработка и применение

ние новых видов топлива, таких как водородные топливные элементы, биотопливо и синтетическое топливо, которые помогают снизить выбросы загрязняющих веществ и уменьшить зависимость от топливных ресурсов; «умные дороги» и сопутствующая инфраструктура: внедрение сенсоров, светодиодных экранов и других технологий для оптимизации дорожного движения, предотвращения дорожно-транспортных происшествий и ускорения ремонтных работ; синхронизация и автоматизация транспортной логистики: комплексные системы для управления складскими запасами, прогнозирования спроса и оптимизации цепочки поставок, что повышает эффективность и снижает затраты; концепция зеленого транспорта: создание экологических транспортных систем, минимизирующих воздействие на окружающую среду, включая программы увеличения доступности средств индивидуальной мобильности, увеличение количества (протяженности) пешеходных зон.

Можно выделить будущие направления развития транспорта, изучение которых значимо с позиций общественной географии: рост важности времени для пассажирских и грузовых перевозок; сверхбыстрый наземный транспорт: гиперлупы, мегасамолеты: более крупные воздушные суда для массовых перевозок пассажиров воздушным транспортом; дроны-доставщики: использование городского воздушного пространства; электрификация: электромобили, гибридные автомобили, электрические самолеты; вертикальная транспортировка и мобильность внутри зданий; разнообразные малые транспортные средства: автомобили меньшего размера, складные городские автомобили и т.д.; рациональное использование времени в пути: автоматизация транспортных средств; общественная мобильность, то есть совместное владение (шеринг-экономика транспорта), мобильность по требованию; капсулы, перевозимые перевозчиком: капсулы, содержащие людей, грузы или топливо; плавучие центры доставки: морские платформы, контейнерные терминалы; коридоры быстрого автобусного сообщения: системы BRT (скоростных автобусов); центры консолидации грузов в транспортной логистике будущего: грузовые узлы вблизи городских агломераций; высокоскоростной железнодорожный транспорт: технологии высокоскоростных поездов; системы грузовых шаттлов: беспилотные шаттлы для крупногабаритных кон-

тейнеров; умные, динамичные и интерактивные дороги: интерактивное освещение, интеллектуальные источники энергии. Как показали исследования, за рубежом при разработке прогнозных решений в области территориального планирования и в градостроительстве обсуждаются в качестве наиболее перспективных следующие концепции.

*Концепция транзитно-ориентированного развития (ТОР)* – планирование городской застройки [7], которое максимально увеличивает количество жилых, деловых и развлекательных помещений в пределах пешеходной доступности от общественного транспорта. При этом применение концепции ТОР направлено на относительное увеличение количества пассажиров общественного транспорта за счет сокращения использования личных автомобилей и других личных транспортных средств, не противореча проблеме устойчивого роста поселений. Концепция ТОР обычно включает центральную транзитную остановку (например, железнодорожную станцию, остановку легкорельсового транспорта или автобуса), окруженную районом с высокой плотностью населения, а районы с более низкой плотностью населения распределяются во все стороны от этого центра, являясь частью интегрированной транспортной сети. В рамках применения концепции ТОР новые районы поселения проектируются таким образом, чтобы стать более пешеходными территориями. Однако противники применения концепции ТОР утверждают, что люди во всем мире предпочитают жить в условиях низкой плотности. Поэтому любая политика, поощряющая более компактную застройку, приведет к значительному снижению полезности и, следовательно, к большим затратам на социальное обеспечение. Близкой по значению является *концепция транзитной пустыни* (она представлена ниже по тексту в настоящей статье).

*Концепция пятнадцатиминутного города* – это градостроительная концепция, согласно которой до большинства объектов получения повседневной необходимости и услуг можно будет добраться за 15 мин пешком, на велосипеде или общественном транспорте из любой точки города. Этот подход направлен на снижение зависимости от автомобилей, пропаганду здорового образа жизни, повышение благосостояния и качества жизни горожан [6; 7]. Реализация концепции «15-минутный город» требует междисциплинарного подхода, включающе-

го транспортное планирование, городской дизайн и разработку градостроительной политики для создания хорошо продуманных общественных пространств, удобных для пешеходов улиц и многофункциональной застройки.

*Концепция транспортного разрыва* (концепция транспортного неблагополучия) означает неравный доступ отдельных частей населения к транспортным услугам, что приводит к социальной изоляции обездоленных групп [8]. Российские аналоги: *концепция транспортной уязвимости населения*, а также *концепция транспортной дискриминация населения*. Концепция охватывает широкий спектр вопросов – от неравного доступа к общественному транспорту до неравных возможностей в региональной и глобальной миграции из-за различий в визовой политике как части глобального разрыва между Севером и Югом. Существует несколько аспектов транспортного разрыва. Люди могут испытывать трудности при пользовании транспортной системой из-за физических барьеров, таких как отсутствие доступности для инвалидов (отсутствие доступа для инвалидов колясок также влияет на людей с детскими колясками или велосипедами). Еще одним из барьеров может служить недостаточная маркировка на транспорте, что также может создавать проблемы для людей, не говорящих на местном языке. Финансовые барьеры в виде стоимости услуг могут помешать бедным людям пользоваться транспортными услугами. Расстояние (в виде удаленности от дома) может сделать некоторые районы недоступными для людей без автомобиля, особенно если местный общественный транспорт слабо развит. Существуют также барьеры страха или безопасности, например такие, как боязнь нахождения в замкнутом пространстве транспортного средства рядом с людьми другого пола, которые могут вести себя неадекватно. Это приводит к созданию пассажирских вагонов или отдельных купе в поездах только для женщин. Попытки устранить барьеры страха путем усиления наблюдения и охраны порядка, однако, привели к снижению использования таких услуг другими группами населения, например молодежью. Ученые и градостроители предлагают различные решения: улучшение общественного транспорта и повышение его доступности, субсидирование частного транспорта и изменение планировки городов для повышения мобильности.

Растущая глобализация оказала существенное влияние на многие городские регионы. Экономическая реструктуризация привела к появлению городских экономических центров с окружающими их пригородами. Джентрификация (качественное изменение отдельных районов и кварталов городов, ранее пришедших в упадок, за счет комплекса мероприятий по их благоустройству, привлечению инвестиций и новых жителей, имеющих высокий уровень благосостояния) заставила малообеспеченных людей и домохозяйства переезжать дальше за пределы городского центра, создавая тем самым рост потребности в доступном и стабильном транспорте. Этот пространственный и экономический сдвиг усугубил транспортное неблагополучие. На транспортное неравенство населения и его мобильность оказала определенное негативное влияние и жилищная политика в ряде стран. Например, субсидирование крупных жилых комплексов в пригородных районах некоторых западных стран привело к концентрации бедности в городских районах. Субсидирование жилья с низким уровнем дохода в районах с низкой плотностью населения создает изолированные сообщества с ограниченным доступом к транспорту. Очень трудно связать отдаленные пригородные районы общественным транспортом, в то время как домохозяйства с низким уровнем дохода пытаются получить равный доступ к частному транспорту.

*Концепция автомобильной зависимости* [9] – это позиция в городском и региональном планировании, когда существующая и планируемая транспортная инфраструктура нацелена на преимущественное использование личных автомобилей перед другими видами транспорта, такими как общественный транспорт, велосипеды, самокаты и пешие передвижения. Во многих современных городах автомобили удобны, а иногда и необходимы для комфортного передвижения. Однако доказано, что, если ориентироваться при городском планировании на преимущественное использование личных автомобилей, возникает так называемый «эффект спирали». Это означает, что перегруженность автомобильных дорог порождает рост спроса на новые и модернизированные дороги и их развязки, якобы для устранения инфраструктурных препятствий для транспортного потока. Такие меры действительно делают использование автомобилей более выгодным, однако –

за счет отставания развития других видов транспорта, что приводит в итоге к увеличению интенсивности движения. При таком подходе перспективная планировка городов подстраивается под потребности автомобилей в плане передвижения в пространстве. Здания и зеленые пространства все более и более замещаются парковками. Открытые торговые улицы заменяются закрытыми торговыми центрами. На смену банкам и магазинам быстрого питания приходят неудобные для пешеходов «автомобильно-ориентированные» предприятия сферы обслуживания, обслуживающие в том числе водителей прямо в автомобилях. Городские центры со смешанным коммерческим, торговым и развлекательным набором функций заменяются однофункциональными бизнес-парками, торговыми комплексами так называемых «убийц категорий» и развлекательными комплексами типа «мультиплекс», каждый из которых окружен большими парковочными площадями. Для подъезда к таким объектам требуются автомобили, что приводит к увеличению интенсивности движения на дорогах. Это приводит к образованию заторов, и цикл, описанный выше, повторяется. Дорог становится все больше, под них изымается все больше участков ценной городской земли, ранее использовавшейся под жилье, производство и другие социально и экономически полезные цели. Общественный же транспорт постепенно становится все менее и менее жизнеспособным и привлекательным для жителей, а в худшем случае – подвергается общественному осуждению, превращаясь в итоге в «транспортное меньшинство». Свобода выбора населения жить в городе без использования личного автомобиля ощущаются сокращается. В итоге такие города становятся автомобильно-зависимыми. Это приводит и к такому негативному последствию, как снижение экологической устойчивости в целом на планете из-за растущего потребления невозобновляемых ресурсов и выбросов парниковых газов, ответственных за глобальное потепление.

Кроме того, автомобилезависимость – это также проблема социальной и культурной устойчивости городских сообществ. Подобно любым закрытым сообществам, личный автомобиль создает определенное размежевание, или физическое разделение между людьми и сокращает возможности социальных контактов, которые являются важным аспектом поддержания благополучия жителей городов.

*Концепция сокращения бедности при использовании велосипеда*, согласно которой доступ к велосипедам и транспортной инфраструктуре для их поддержки может значительно сократить бедность [6]. Это было продемонстрировано в различных пилотных проектах в Южной Азии и Африке. Эксперименты, проведенные в Африке (Уганда и Танзания) и Шри-Ланке на сотнях домохозяйств в последние 15–20 лет, показали, что велосипед может увеличить доход бедной семьи на целых 35%. Транспорт, если его проанализировать с точки зрения соотношения затрат и выгод для борьбы с бедностью в сельской местности, дает одну из самых высоких отдач в этом отношении. Например, в 1990-х гг. инвестиции в дороги в Индии были в 3–10 раз эффективнее, чем почти все другие инвестиции и субсидии в сельскую экономику. Дорога может облегчить транспорт на макроуровне, в то время как доступ к велосипеду поддерживает его на микроуровне. В этом смысле велосипед может стать одним из самых эффективных средств искоренения бедности в развивающихся странах.

*Концепция транспортно-ориентированного развития городов и агломераций* [8; 9]. В основе концепции лежит идея максимально эффективного использования территории вблизи транспортного узла. Согласно этой концепции, «Транспортно-ориентированная зона» представляет собой район, в центре которого расположен крупный транспортный узел (железнодорожная станция, станция метрополитена, остановка трамвая, троллейбуса или автобуса), вокруг которого в радиусе не более 400 м расположена зона высокоплотной многофункциональной застройки, ориентированной на пешеходное передвижение. Далее, в зоне радиусом до 800 м от центра, располагается менее плотная застройка с меньшей этажностью, ориентированная на поддержание ядра транспортно-ориентированной зоны.

*Концепция транзитной пустыни* [9]. Транзитная пустыня – это район с ограниченной транспортной доступностью. Концепция продолжает и углубляет исследование ранее созданной концепции транспортно-ориентированного развития. Транзитные пустыни обычно характеризуются плохим выбором общественного транспорта и зачастую плохой велосипедной или автодорожной инфраструктурой. Отсутствие транспортных возможностей в транзитных пустынях может иметь негативные последствия для здоровья людей, для перспектив

трудоустройства и в целом для пространственной мобильности. Подобное представление при проектировании городской застройки иногда применялось к районам, где отсутствуют такие ключевые услуги, как банки, доступ к продуктам питания или к иным массовым общественным услугам. Представление о транзитных пустынях впервые появилось в 2013 г. С тех пор концепция транзитных пустынь была развита и расширена, в ней появились конкурирующие определения и методы измерения. В частности, появились методы измерения транзитных пустынь на основе оценки так называемых «транспортных разрывов». Для измерения разрыва между спросом и предложением на транспорт используются методы, основанные на географических информационных системах [10–12]. Спрос и предложение определяют количествен-

но, затем вычитают спрос из предложения, чтобы найти «разрыв» в транзитных услугах. Территории, которые оказываются при таком расчете ниже определенного порога, называются «транзитными пустынями». Исследования, проведенные с помощью этого метода, показали, что почти во всех городах США есть транзитные пустыни, при этом выяснилось, что *центральные деловые районы городов почти никогда не являются транзитными пустынями, и локальное расположение транзитных пустынь в разных городах значительно отличается*. Появилось и более неофициальное определение транзитных пустынь, согласно которому *транзитными пустынями называют районы, в которых отсутствует какой-либо вид транспорта, чаще всего общественного, например автобусы или остановки метрополитена*.

Сравнение новейших концепций в области транспорта  
и возможность их применения в российских условиях  
(в территориальном планировании и градостроительстве)

Название зарубежной концепции	Время начала разработки (применения) концепции за рубежом	Наличие российского аналога в территориальном планировании и градостроительстве	Возможность использования в России в территориальном планировании и градостроительстве
Концепция транзитно-ориентированного развития	1993–2020 гг.	Отсутствует	Для создания местных нормативов градостроительного проектирования. Для создания генеральных планов
Концепция транзитной пустыни	с 2013 г.	Отсутствует	Для создания местных и региональных нормативов градостроительного проектирования
Концепция пятнадцатиминутного города	с 2016 г.	Частично: понятие пешеходной транспортной доступности: СНиПы и др. стандарты.	Для создания местных нормативов градостроительного проектирования. Для создания генеральных планов и мастер-планов городов разного типа
Концепция транспортного разрыва (концепция транспортного неблагополучия)	с 2010 г.	Концепция транспортной уязвимости населения. Концепция транспортной дискриминации населения	Для создания местных региональных нормативов градостроительного проектирования
Концепция сокращения бедности при использовании велосипеда	с 2010 г.		Возможность использования ограничена из-за специфики российских природно-климатических условий
Концепция автомобильной зависимости	В 1960–2015 гг.	Отсутствует («автомобильный синдром», «автомобилизм» в психологических науках)	Для создания местных нормативов градостроительного проектирования, планов комплексного транспортного обслуживания населения
Концепция транспортно-ориентированного развития городов и агломераций	В 1989–2015 гг.	Частично – отдельные положения Транспортной стратегии РФ и Стратегии пространственного развития РФ	Для создания схем территориального планирования и ПКРТИ муниципальных образований, агломераций и субъектов РФ

Источник: составлено авторами.

Для учета зарубежного опыта необходимо изменение не только процедуры (последовательности), но и конечных целей учета транспортного фактора в градостроительстве и территориальном планировании [13–15]. В обобщенном виде рассматриваемые концепции и возможность их применения в российских условиях (в территориальном планировании и градостроительстве) приведены в таблице.

### Заключение

Анализ приведенных выше зарубежных транспортных концепций показывает возможность их использования в российских условиях. Важно отметить приоритет общественного транспорта и групповых транспортных потребностей над индивидуальным транспортом и личными транспортными потребностями в большинстве из рассмотренных концепций. Многие концепции в основе транспортных проблем городов и городских агломераций видят несовершенство транспортного планирования в прошлые десятилетия, когда приоритеты развития в большей степени отвечали интересам обеспеченных и транспортно-мобильных жителей. Необходимо отметить наличие сторонников и противников низко- и высокоплотной застройки (расселения) в российских городах и городских агломерациях: те или иные концепции ориентированы, как правило, только на одну из двух указанных плотностных форм расселения. Из всех рассмотренных выше зарубежных транспортных концепций в российском градостроительстве в последние годы постепенно начинает приживаться концепция пятнадцатиминутного города. Она близка идеологически и функционально к существующим в России местным нормативам градостроительного проектирования в части территориальной и временной доступности социально значимых объектов. В российских условиях также большой потенциал имеет концепция транспортно-ориентированного развития городов и агломераций. Она в той или иной степени способствует изучению и пониманию транспортной подвижности населения как в целом (включая избыточную подвижность), так и подвижности с социально-культурными целями в российских условиях концентрации населения в крупных городах и зонах их влияния.

Рассмотренные зарубежные концепции в области развития транспорта буду-

щего в целом применимы к российским условиям. Создание новых и внесение изменений в существующие градостроительные документы, а также документы территориального планирования невозможно без учета развития отечественной и зарубежной науки. Важной задачей географии и территориального планирования транспорта на перспективу можно считать изменение и дополнение их содержания с учетом средне- и долгосрочной перспективы развития транспорта. Для улучшения качества территориального планирования транспорта в России рекомендуется рассмотреть возможность внедрения отдельных принципов зарубежных концепций в области транспорта в российские стратегические и концептуальные документы в области градостроительства и территориального планирования.

### Список литературы

1. Крылов П.М. Транспортные системы регионов России: географический анализ проблем и приоритеты развития территорий (по материалам стратегий развития транспорта и автомобильных дорог): монография. М.: ООО «Русайнс», 2021. 202 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://book.ru/book/941869> (дата обращения: 15.05.2025). ISBN: 978-5-4365-7604-6.
2. Доклад о ключевых концепциях транспорта будущего. Рабочий перевод на русский язык Куприяновский В.П., Овсянников М.Л., Шаклеин А.Г. Интенд, 2018. 89 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://cvts.rut.digital/wp-content/uploads/2018/09/Доклад-о-ключевых-концепциях-транспорта-будущего.pdf> (дата обращения: 14.05.2025).
3. Семина И.А. Актуальные вопросы изучения третичного сектора экономики и организации городского общественного пространства: теория, опыт и проблематика // Успехи современного естествознания. 2017. № 11. С. 95–100. URL: <https://natural-sciences.ru/article/view?id=36588> (дата обращения: 30.04.2025).
4. Globalization in Transition: The Future of Trade and Value Chains / McKinsey Global Institute. 2019. 131 p. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mckinsey.com/featured-insights/innovation-and-growth/globalization-in-transition-the-future-of-trade-and-value-chain> (дата обращения: 31.05.2025).
5. Services Trade Policies and the Global Economy. Paris: OECD Publishing, 2017. 108 p. URL: <https://www.oecd.org/publications/services-trade-policies-and-the-global-economy-9789264275232-en.htm> (дата обращения: 30.05.2025).
6. Mau Steffan, Gulzau Fabian, Laube Lene, Zaun Natascha. The Global Mobility Divide: How Visa Policies have evolved over Time // Journal of Ethnic and Migration Studies. 2015. № 41 (8). P. 1192–1213. DOI: 10.1080/1369183X.2015.1005007.
7. Mattioli Giulio, Roberts Cameron, Steinberger, Julia K., Brown Andrew. The political economy of car dependence: A system of provision approach // Energy Research & Social Science. 2020. Vol. 66. № 101486. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214629620300633> (дата обращения: 31.05.2025).
8. How can the bicycle assist in poverty eradication and social development in Africa? International Bicycle Fund. 2014. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.velomondial.net/velomondial2000/PDF/PERSCHON.PDF> (дата обращения: 31.05.2025).

9. Vanderschuren M., Cameron R., Newlands A., Schalekamp H. Geographical Modelling of Transit Deserts in Cape Town. *Sustainability* 2021. № 13. P. 997. URL: [https://www.researchgate.net/publication/348620417\\_Geographical\\_Modelling\\_of\\_Transit\\_Deserts\\_in\\_Cape\\_To](https://www.researchgate.net/publication/348620417_Geographical_Modelling_of_Transit_Deserts_in_Cape_To) (дата обращения: 31.05.2025). DOI: 10.3390/su13020997.
10. Минеев А.Н., Семина И.А., Фоломейкина Л.Н. Анализ транспортной доступности населенных пунктов Республики Мордовия с использованием геоинформационных технологий // *ИнтерКарто. ИнтерГИС*. 2024. Т. 30. № 1. С. 94–111. URL: <http://intercarto.msu.ru/jour/article.php?articleId=1221&lang=ru> (дата обращения: 30.04.2025). DOI: 10.35595/2414-9179-2024-1-30-94-111.
11. Савруков А.Н., Савруков Н.Т. Методика расчета индекса и оценка транспортной доступности субъектов РФ // *Финансы и кредит*. 2020. Т. 26. № 11. DOI: 10.24891/fc.26.11.2410.
12. Gankhuyag U., Myagmarsuren A., Altankhuyag B. Spatial Analysis of Road Network in Mongolia // *Advances in Engineering Research*. 2021. Vol. 206. P. 146–151. URL: [https://www.researchgate.net/publication/356013478\\_Spatial\\_Analysis\\_of\\_Road\\_Network\\_in\\_Mongolia](https://www.researchgate.net/publication/356013478_Spatial_Analysis_of_Road_Network_in_Mongolia) (дата обращения: 29.05.2025). DOI: 10.2991/aer.k.211029.026.
13. Вайтенс А.Г., Митягин С.Д. Территориальное планирование в современной России: проблемы разработки и реализации // *Вестник Зодчий*. 21 век. 2014. № 2 (51). С. 2–7. URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_21781983\\_52239358.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_21781983_52239358.pdf) (дата обращения: 16.05.2025).
14. Шестеров Е.А. Создание координированной транспортной системы при территориально-транспортном планировании развития городских территорий // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2023. Т. 25. № 3. С. 30–38. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sozdanie-koordinirovannoy-transportnoy-sistemy-pri-territorialno-transportnom-planirovanii-razvitiya-gorodskih-territoriy> (дата обращения: 15.05.2025). DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-30-38.
15. Донченко В.В. Транспортное планирование как инструмент транспортной политики: трансформация подходов // *Научный вестник автомобильного транспорта*. 2023. № 1. С. 29–42. URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_54960448\\_33886697.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_54960448_33886697.pdf) (дата обращения: 16.05.2025).

## СТАТЬЯ

УДК 502:631.95:574.635

DOI

**РАЗРАБОТКА СПОСОБА ПОЛУЧЕНИЯ ПОДЩЕЛАЧИВАЮЩЕГО РЕАГЕНТА ДЛЯ ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ ЖИДКИХ СТОКОВ СВИНОВОДЧЕСКИХ ФЕРМ С ПОЛУЧЕНИЕМ ПРОДУКТА С ВЫСОКОЙ АГРОМЕЛИОРАТИВНОЙ ЦЕННОСТЬЮ****Монастырский Д.И., Куликова М.А., Шабельская Н.П.,  
Гайдукова Ю.А., Вяльцев А.В., Сулима С.И.***ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)  
имени М.И. Платова, Новочеркасск, e-mail: shabelskaya.nina@yandex.ru*

В процессе хозяйственной деятельности человека накапливается большое количество отходов. К числу таких отходов относятся фосфогипс – побочный продукт производства фосфорной кислоты, жидкие стоки животноводства, лузга подсолнечника, шелуха риса. Переработка накопленных производственных отходов является актуальной задачей геоэкологии, позволяющей рационально использовать земельные ресурсы, так же как получение востребованных продуктов из отходов производства. Цель исследования – разработка способа получения подщелачивающего реагента из фосфогипса при термической обработке его в присутствии лузги подсолнечника или шелухи риса и применение разработанного реагента для фракционирования жидких стоков свиноводческих ферм с получением продукта с высокой агромелиоративной ценностью. В работе изучен процесс формирования подщелачивающего реагента из фосфогипса в ходе термической обработки его в присутствии шелухи риса и лузги подсолнечника. Полученные материалы были использованы в процессе фракционирования жидких стоков свиноводства. Установлены оптимальные режимы термообработки фосфогипса с получением образца с высоким содержанием оксида кальция. В результате проведенного исследования установлено, что отход производства ортофосфорной кислоты – фосфогипс – может быть использован для получения подщелачивающего реагента для фракционирования сточных вод свиноводства. Был выявлен образец с оптимальными параметрами фракционирования, такими как скорость осаждения, прозрачность надосадочной жидкости, объем уплотненного осадка. Полученная после фракционирования надосадочная жидкость и органоминеральное удобрение могут быть использованы для полива и удобрения сельскохозяйственных культур.

**Ключевые слова:** переработка фосфогипса, восстановительный обжиг, органоминеральное удобрение, подщелачивающий реагент

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания проекта FENN-2024-0006 «Разработка технологии неорганических ультрафиолетовых красителей».*

**DEVELOPMENT OF A METHOD FOR OBTAINING AN ALKALIZING REAGENT FOR FRACTIONATION OF LIQUID EFFLUENTS FROM PIG FARMS TO PRODUCE A PRODUCT WITH HIGH AGRO-RECLAMATION VALUE****Monastyrskiy D.I., Kulikova M.A., Shabelskaya N.P.,  
Gaydukova Yu.A., Vyaltsev A.V., Sulima S.I.***South-Russian State Polytechnic University named after M.I. Platov (NPI), Novocherkassk,  
e-mail: shabelskaya.nina@yandex.ru*

In the process of human economic activity, a large amount of waste accumulates. Such wastes include phosphogypsum, a by-product of phosphoric acid production, liquid wastewater from animal husbandry, sunflower husks, and rice husks. Recycling of accumulated industrial waste is an urgent task of geoecology, which allows for the rational use of land resources, as well as obtaining high-demand products from industrial waste. The aim of the study was to develop a method for obtaining an alkalizing reagent from phosphogypsum during heat treatment in the presence of sunflower husks or rice husks and to use the developed reagent for fractionation of liquid effluents from pig farms to obtain a product with high agro-reclamation value. The paper studies the process of formation of an alkalizing reagent from phosphogypsum during its heat treatment in the presence of rice husks and sunflower husks. The obtained materials were used in the process of fractionation of pig breeding liquid effluents. The optimal regimes of phosphogypsum heat treatment were established to obtain a sample with a high content of calcium oxide. As a result of the study, it was found that waste from the production of orthophosphoric acid, phosphogypsum, can be used to produce an alkalizing reagent for fractionation of pig farming wastewater. A sample with optimal fractionation parameters was identified, such as the deposition rate, the transparency of the filler fluid, and the volume of the compacted sediment. The filler liquid and organomineral fertilizer obtained after fractionation can be used for irrigation and fertilization of agricultural crops.

**Keywords:** phosphogypsum processing, reducing roasting, organomineral fertilizer, alkalizing reagent

*The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment of the project FENN-2024-0006 “Development of technology of inorganic ultraviolet dyes”.*

### Введение

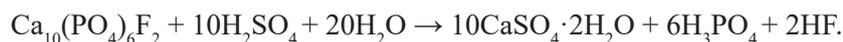
Во всем мире животноводство показывает устойчивые темпы роста, производя миллиарды тонн навоза скота и птицы в год [1], при этом общий коэффициент его использования составляет менее 60% [2]. Особенно распространена проблема загрязнения свиным навозом [3]. Неправильная утилизация навоза приводит к ряду экологических проблем, включая загрязнение почвы, выбросы парниковых газов, распространение патогенных микроорганизмов. В то же время свиной навоз служит ценным источником аминокислот и питательных веществ, необходимых для роста сельскохозяйственных культур, включая азот (N), фосфор (P), калий (K). Поскольку сточные воды животноводческих хозяйств обладают как загрязняющими, так и ресурсными свойствами [4], они должны быть вовлечены в процессы повторного использования.

Агропродовольственная промышленность приобрела глобальное значение благодаря растущему спросу в связи с ростом населения мира [5]. В этой связи остро встает необходимость решения проблемы большого объема отходов, образующихся в ходе производственных процессов [6]. Среди агропродовольственных отраслей промышленности подсолнечное масло является одним из основных видов пищевого масла в мире. В связи с его ростом и стабильностью рынка [7] изучение новых методологий преобразования его отходов в экологически устойчивые продукты становится насущной необходимостью. Подсолнечник однолетний (*Helianthus annuus*) – однолетнее сельскохозяйственное растение с относительно коротким циклом роста, высокой засухоустойчивостью и адаптивностью к различным почвенным условиям [8]. Шелуха подсолнечника составляет 45–60% веса семян и обычно используется в сельском хозяйстве и производстве продуктов питания для животных. Рис и кукуруза считаются наиболее важными продуктами пи-

тания во всем мире [9, 10], удовлетворяя основные диетические потребности почти половины населения мира и служа основным источником средств к существованию для значительной части людей. Рисовая шелуха является значительным побочным продуктом производства риса, составляя примерно 30% от общей площади рисового растения. Фактически во время промышленной обработки риса-сырца несъедобная рисовая шелуха удаляется из зерна, и этот побочный продукт составляет около 25% от веса пищевого риса. Эта фракция формально является промышленными отходами и в настоящее время не используется в полном объеме, но может стать экономически, экологически и социально устойчивым источником материалов на биологической основе с высоким потенциалом. Примечательно также, что наличие шелухи на рисовых полях может быть крайне вредным для окружающей среды, поскольку она устойчива к разрушению, а присутствие воды во время наводнений способствует их анаэробной деградации с образованием метана, мощного парникового газа, действие которого в 25 раз превышает воздействие CO<sub>2</sub>.

Состав рисовой шелухи очень интересен тем, что она представляет собой один из наиболее доступных источников целлюлозы, основанный на ее высокой целлюлозной доле (~33 мас.%). Кроме того, он содержит гемицеллюлозу (~20 мас.%), лигнин (~22 мас.%) и диоксид кремния (~20 мас.%) [10].

Фосфогипс – побочный продукт, образующийся в результате промышленной переработки апатитов (примерная формула Ca<sub>10</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>6</sub>F<sub>2</sub>) и серной кислоты [11, 12] в процессе получения ортофосфорной кислоты «мокрым» способом, он кристаллизуется в виде дигидрата CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O – гипса, полугидрата CaSO<sub>4</sub>·0,5H<sub>2</sub>O – бассанита или CaSO<sub>4</sub> – ангидрита. Химическая реакция, приводящая к образованию фосфогипса, выражается уравнением [13, 14]:



На каждую тонну произведенной фосфорной кислоты приходится около 5 т фосфогипса [15]. Это сильнокислотное вещество (pH < 5), в виде серовато-белого порошка, основным компонентом которого является CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O (обычно более 70%). Он также содержит фосфор (P), в зависимости от производственного процесса и источника фосфатной породы, используемой при

производстве фосфорной кислоты, может содержать фтор (F), тяжелые металлы, редкоземельные элементы и т.д. [16, 17].

Количество производимого фосфогипса огромно: мировое производство фосфогипса достигает 7 млрд т и ежегодно увеличивается на 250 млн т. Долгое время из-за отсутствия эффективных методов утилизации фосфогипс в основном складировали, обра-

зую многочисленные отвалы. Это не только занимает земельные ресурсы, но и представляет угрозу для окружающей среды и здоровья людей [18].

Таким образом, можно заключить, что переработка накопленных производственных отходов (как промышленных, так и сельскохозяйственных) является актуальной задачей геоэкологии, позволяющей рационально использовать земельные ресурсы, так же как получение востребованных продуктов из отходов производства.

Основной целью исследования была разработка способа получения подщелачивающего реагента из фосфогипса при термической обработке его в присутствии лузги подсолнечника или шелухи риса и применение разработанного реагента для фракционирования жидких стоков свиноводческих ферм с получением продукта с высокой агрономелиоративной ценностью.

#### Материалы и методы исследования

В качестве основного материала для проведения комплексного исследования использовали фосфогипс по ГОСТ Р 58820-2020 Фосфогипс для сельского хозяйства, содержащий  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  не менее 99% (мас.).

В качестве восстановителя использовали: лузгу подсолнечника (ТУ. ТИ 1.41.41-357-37676459-2022. Лузга подсолнечника); шелуху риса (производитель «ИП Корелин А.А.», Россия).

Для выравнивания кислотности раствора после проведения процесса фракционирования использовали муравьиную кислоту 85% (мас.) квалификации ХЧ, производство Scharlab.

Для получения органической составляющей удобрения применяли свиной навоз фермерских хозяйств Ростовской области.

Синтез материалов. Фосфогипс и восстановитель тщательно смешивали в пропорциях фосфогипс: восстановитель = (1,7–34,4): 1. Для смешивания использовали лабораторный смеситель (частота оборотов 1500 об/мин, в течение 30 с). Затем смесь в алунодовых тиглях помещали в рабочее пространство печи. Спекание проводили в муфельной печи марки «SNOL 6,7/1300» при температурах 700–1200°C, шаг изменения температуры 100°C, скорость набора температуры 13°C/мин, продолжительность изотермической выдержки 30–90 мин. По окончании термообработки – остывание образцов медленно, с печью.

Изучение возможности использования синтезированных материалов для фракционирования сточных вод свиноккомплексов.

Для экспериментального исследования использовали модельный гидросмыв свиноккомплекса, состоящий из свиного навоза и воды в соотношении 1:6. В 210 мл сточных вод добавляли 100 мл 10%-ной суспензии. Контролировали интенсивность уплотнения, объем уплотненного осадка, цвет и рН надосадочной жидкости.

Эксперимент по обработке модельных сточных вод на объеме 700 мл проводили с добавлением суспензии 100–300 мл с различным содержанием реагента 10–30% (мас.). Сравнивали показатели интенсивности реакции, объема уплотненного осадка, рН и мутности надосадочной жидкости.

#### Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 1 приведены данные по изучению влияния количества введенного восстановителя и температуры термообработки. Во всех случаях продолжительность термообработки составляла 60 мин, оценена степень деструкции сульфата кальция  $\Delta m, \%$ , в зависимости от температуры термообработки, восстановитель – лузга подсолнуха.

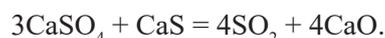
На рис. 2 приведены данные по изучению влияния количества введенного восстановителя и температуры термообработки. Во всех случаях продолжительность термообработки составляла 60 мин, оценена степень деструкции сульфата кальция  $\Delta m, \%$ , в зависимости от температуры термообработки, восстановитель – шелуха риса.

Уменьшение массы образца связано с протеканием реакции



Получено, что с повышением температуры термообработки потеря образца в массе увеличивается. Эта зависимость наблюдается для всех изученных соотношений фосфогипс: восстановитель.

Также при увеличении количества восстановителя в образце, независимо от соотношения исходных веществ, увеличивается потеря образца в массе. Для восстановителя – шелухи риса – наибольшая степень деструкции сульфата кальция (47,3% (мас.)) отмечена при температуре термообработки 1100°C), максимальном количестве введенного восстановителя. С повышением температуры термообработки до 1200 °C с максимальным количеством введенного восстановителя наблюдали некоторое снижение потери массы, предположительно связанное с протеканием реакции



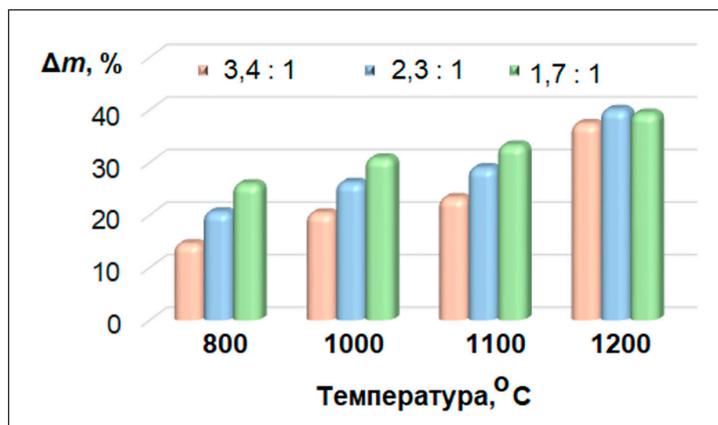


Рис. 1. Степень деструкции сульфата кальция в зависимости от температуры термообработки, восстановитель – лузга подсолнуха  
Источник: составлено авторами по результатам данного исследования

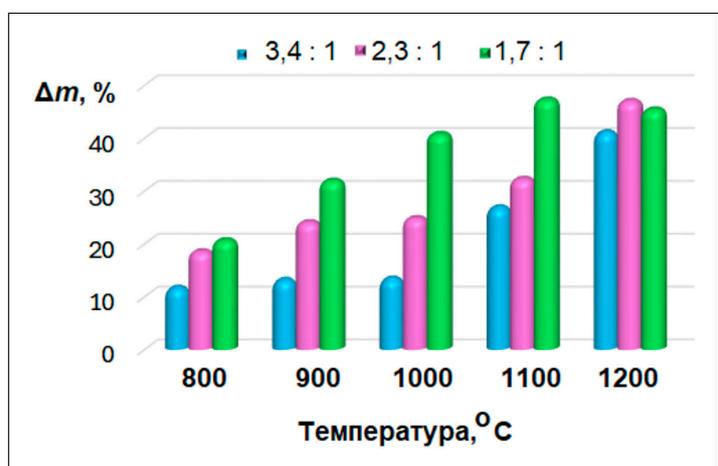


Рис. 2. Степень деструкции сульфата кальция в зависимости от температуры термообработки, восстановитель – шелуха риса  
Источник: составлено авторами по результатам данного исследования

Следует отметить, что при сгорании шелухи риса, в отличие от лузги подсолнечника, отмечена высокая зольность, связанная, вероятно, с присутствием соединений кремния в исходном восстановителе.

Разработанный подщелачивающий реагент, полученный в процессе термического разложения фосфогипса в присутствии восстановителя, был использован в процессе фракционирования жидких стоков. Для исследования использовали гидросмыв свиноксеплекса, состоящий из свиного навоза и воды в соотношении 1:6. В реакционный сосуд вносили 210 мл сточных вод, затем добавляли 100 мл 10%-ной суспензии разработанного реагента. Наблюдали фракционирование суспензии (рис. 3, а) с форми-

рованием осадка и надосадочной жидкости. В случае, когда подщелачивающий реагент содержал недостаточное количество оксида кальция для создания среды с  $\text{pH} \geq 10$ , фракционирования не наблюдали (рис. 3, б).

Использование лузги подсолнечника в качестве восстановителя приводило к образованию суспензии серого цвета до температуры термообработки  $1000^\circ\text{C}$ , в этих же образцах отмечено наличие остатков восстановителя.

Использование шелухи риса в качестве восстановителя приводило к образованию суспензии серого цвета при низких температурах ( $700\text{--}800^\circ\text{C}$ ) термообработки. При увеличении температуры термообработки получали прозрачный раствор.

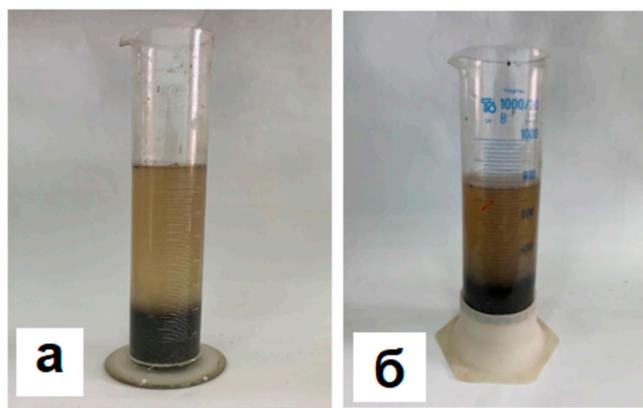


Рис. 3. Процесс фракционирования сточных вод  
 Источник: составлено авторами по результатам данного исследования

Данные по условиям получения реагента и фракционированию сточных вод

Восстановитель, соотношение с фосфогипсом	Условия получения, °С	рН суспензии	Объем осадка, л	Надосадочная жидкость
Рис, 3,4 : 1	900	9	0,17	мутная
Рис, 1,7 : 1	900	9	0,14	мутная
Рис, 3,4 : 1	1100	11	0,16	прозрачная
Рис, 3,4 : 1	1200	12	0,16	прозрачная
Рис, 2,3 : 1	1200	12	0,17	прозрачная
Рис, 1,7 : 1	1200	12	0,20	прозрачная
Подсолнечник, 2,3 : 1	1000	10	0,20	мутная
Подсолнечник, 3,4 : 1	1100	10	0,15	прозрачная
Подсолнечник, 1,7 : 1	1100	11	0,18	прозрачная
Подсолнечник, 3,4 : 1	1200	8	0,15	мутная
Подсолнечник, 2,3 : 1	1200	10	0,20	прозрачная

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

В таблице приведены данные по фракционированию сточных вод под действием суспензии полученных образцов. При использовании лузги подсолнечника в качестве восстановителя получается реагент, при действии которого на суспензию сточных вод свиноводческих ферм происходит фракционирование, при этом прозрачный раствор надосадочной жидкости отмечен только для образцов, термообработанных при температуре 1000–1200°С. Для реагентов, полученных с применением шелухи риса, прозрачный раствор надосадочной жидкости образуется при использовании образцов, термообработанных при температурах 900–1200°С. Однако наличие балластного минерального остатка (наличие в составе рисовой шелухи мелкодисперсного оксида кремния) делает менее привлекательным использование данного восстановителя.

Таким образом, по совокупности параметров фракционирования (скорость протекания реакции, максимальное уплотнение, прозрачность надосадочной жидкости) и отсутствию дополнительных минеральных составляющих, для применения в качестве подщелачивающего реагента может быть рекомендован фосфогипс, термообработанный в присутствии лузги подсолнечника в соотношении фосфогипс: восстановитель 3,4:1 при температуре термообработки 1100 °С.

Надосадочная жидкость была нейтрализована до значения рН 7 раствором муравьиной кислоты и использована для полива сельскохозяйственных растений. Проведенные испытания показали высокую всхожесть семян редиса. Полученное органоминеральное удобрение было использовано для удобрения почвы в количе-

стве 1 г/кг грунта и также показало положительное влияние на всхожесть исследуемой культуры.

### Выводы

В результате проведенного исследования установлено, что:

– отход производства ортофосфорной кислоты – фосфогипс – может быть использован для получения подщелачивающего реагента для фракционирования сточных вод свиноводства;

– оптимальными параметрами фракционирования (скорость осаждения, прозрачность надосадочной жидкости, объем уплотненного осадка) обладает образец, полученный термообработкой фосфогипса в присутствии восстановителя – лузги подсолнечника в соотношении фосфогипс: восстановитель 3,4:1 при температуре термообработки 1100 °С;

– полученная после фракционирования надосадочная жидкость и органоминеральное удобрение могут быть использованы для полива и удобрения сельскохозяйственных культур, в обоих случаях отмечена высокая всхожесть семян редиса.

### Список литературы

1. Wang S., Du X., Yin R., Sun H., Song B., Han Q., Wang J., Huang Y. Performance of co-composting *Pholiota nameko* spent mushroom substrate and pig manure at different proportions: Chemical properties and humification process // *Journal of Environmental Management*. 2024. Vol. 372. P. 123325. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.123325.
2. He T., Zhang W.Y., Zhang H.W., Sheng J.L. Estimation of manure emissions issued from different Chinese livestock species: potential of future production // *Agriculture*. 2023. Vol. 13, Is. 11. P. 2143. DOI: 10.3390/agriculture13112143.
3. Gong X.Q., Zhang Z.T., Wang H. Effects of *Gleditsia sinensis* pod powder, coconut shell biochar and rice husk biochar as additives on bacterial communities and compost quality during vermicomposting of pig manure and wheat straw // *Journal of Environmental Management*. 2021. Vol. 295. P. 113136. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.113136.
4. Wang C., He Z., Usman M., El-Din M.G., Liu Z., Luo Z., Li H., Xiao D., Qian Q., Wu Z. Optimizing drying of municipal dewatered sludge using heat-assisted microorganisms and pig manure addition: A process and economic analysis // *Waste Management Bulletin*. 2025. Vol. 3, Is. 4. P. 100193. DOI: 10.1016/j.wmb.2025.100193.
5. Ramirez L.A., Alvarez M., Gutierrez V.S. From agro-alimentary residue to catalyst: Transforming sunflower seed husk waste into modified biochar for efficient ibuprofen degradation in water // *Journal of Water Process Engineering*. 2025. Vol. 72. P. 107458. DOI: 10.1016/j.jwpe.2025.107458.
6. Nath P.C., Ojha A., Debnath S., Sharma M., Sridhar K., Nayak P.K., Inbaraj B.S. Biogeneration of valuable nanomaterials from agro-wastes: a comprehensive review // *Agronomy*. 2023. Vol. 13. P. 561–596. DOI: 10.3390/agronomy13020561.
7. Pilorgé E. Sunflower in the global vegetable oil system: situation, specificities and perspectives OCL – Oilseeds and fats // *Crops and Lipids*. 2020. Vol. 27, Is. 1. P. 34–44. DOI: 10.1051/ocl/2020028.
8. Matyasik I., Brzeszcz J., Labus M., Kania M., Mroczkowska-Szerszeń M., Dudek L. The effect of microbiological pretreatment on pyrolysis process of sunflower husk // *Journal of Environmental Management*. 2025. Vol. 379. P. 124861. DOI: 10.1016/j.jenvman.2025.124861.
9. Kumar A., Pandey D.S., Mondal T. Experimental investigation of process parameters for hydrogen-rich syngas production from rice husk gasification // *Sustainable Chemistry for Climate Action*. 2025. Vol. 6. P. 100061. DOI: 10.1016/j.scca.2025.100061.
10. Conteroso E., Paul G., Toson V., Gianotti V., Milanesio M., Gastaldi D., Boccaleri E. Single step eco-efficient mild chemical process for the total valorisation of rice husk: a focus on the inorganics as a cement additive // *RSC Advances*. 2024. Vol. 14, Is. 49. P. 36314–36326. DOI: 10.1039/d4ra05263c.
11. Papastefanou C., Stoulos S., Ioannidou A., Manolopoulou M. The application of phosphogypsum in agriculture and the radiological impact // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2006. Vol. 89, Is. 2. P. 188–198. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2006.05.005.
12. Ammar R., Kanbar H.J., Kazpard V., Wazne M., El Samrani A.G., Amacha N., Saad Z., Chou L. Role of phosphogypsum and NPK amendments on the retention or leaching of metals in different soils // *Journal of Environmental Management*. 2016. Vol. 178. P. 2–29. DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.04.042.
13. Zhang L., Mo K.H., Tan T.H., Hung C.-C. Poh Y.S., Ling (Bill) T.-C. Influence of calcination and GGBS addition in preparing  $\beta$ -hemihydrate synthetic gypsum from phosphogypsum // *Case Studies in Construction Materials*. 2023. Vol. 19. P. e02259. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e02259.
14. Tayibi H., Choura M., López F.A., Alguacil F.J., López-Delgado A. Environmental impact and management of phosphogypsum // *Journal of Environmental Management*. 2009. Vol. 90, Is. 8. P. 2377–2386. DOI: 10.1016/j.jenvman.2009.03.007.
15. Liu Y., Zhang L., Xue B., Chen L., Wang G., Wang J., Wan H., Lin X., Zhu G. Simulation of red mud/phosphogypsum-based artificial soil engineering applications in vegetation restoration and ecological reconstruction // *Science of The Total Environment*. 2024. Vol. 951. P. 175656. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.175656.
16. Bouhssa M.L., Hakkar M., Arhouni F.E., Ouakkas S., Boukhaïr A. Efficiency of acid mixtures for mitigating the radioactive contaminants in phosphogypsum // *Radiation Physics and Chemistry*. 2024. Vol. 225. P. 112152. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2024.112152.
17. Abril J.M., García-Tenorio R., Perriñez R., Enamorado S.M., Andreu L., Delgado A. Occupational dosimetric assessment (inhalation pathway) from the application of phosphogypsum in agriculture in South West Spain // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2009. Vol. 100, Is. 1. P. 29–34. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2008.09.006.
18. Wu F. The treatment of phosphogypsum leachate is more urgent than phosphogypsum // *Environmental Research*. 2024. Vol. 262. Part 1. P. 119849. DOI: 10.1016/j.envres.2024.119849.

СТАТЬИ

УДК 528.2/.3/.5  
DOI

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ТОЧНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ  
НА НЕПРЕРЫВНО ДЕЙСТВУЮЩИХ ОПОРНЫХ  
СТАНЦИЯХ GNSS В РЕСПУБЛИКЕ ЛИВАН**

<sup>1,2</sup>Акл М.Н., <sup>1</sup>Половнев О.В., <sup>1</sup>Насереддин Х.Х.

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»,  
Москва, e-mail: maher.n.akl@gmail.com;

<sup>2</sup>Ливанский международный университет, Бейрут

В статье представлено исследование применения метода точного позиционирования для определения координат базовых станций непрерывного действия в целях обновления геодезической сети и прогнозирования движения земной коры Ливана. В Ливане отсутствуют пункты геодезической сети с постоянно действующей на них спутниковой навигационной аппаратурой, позволяющей обеспечивать пользователей актуальной информацией с достаточной точностью. Для определения движений земной коры и изменений положений пунктов геодезической сети необходимы постоянные наблюдения на станциях глобальной навигационной спутниковой системы с обработкой информации в режиме близком к режиму реального времени, а также с возможностью наращивания точности, близкой к сети первого и второго порядков. Проведен эксперимент для проверки применения метода точного позиционирования. Метод точного позиционирования – это метод спутникового позиционирования, который обеспечивает высокую точность определения координат, посредством получения навигационных поправок от постоянно действующих станций посредством специального сервиса – источника таких поправок. Используя метод точного позиционирования, инженеры-геодезисты могут определять точные географические координаты, повышать общую точность геодезической сети. В исследовании подчеркивается значение точных геодезических координат для непрерывно действующих опорных станций, для модернизации спутниковой геодезической сети, для повышения надежности и эффективности методов съемки, особенно в районах, подверженных сейсмической и геодинамической активности. По итогам исследований сделан вывод, что метод точного позиционирования не полностью удовлетворяет требованиям точности, предъявляемым к базовым станциям, дополнительно необходимо организовать специальный национальный сервис по получению и трансляции специальных навигационных поправок для достижения необходимой точности.

**Ключевые слова:** геодезическая сеть, глобальная система позиционирования, точное позиционирование, сейсмическая и геодинамическая активность, непрерывно действующие опорные станции

**APPLICATION OF PRECISE POSITIONING METHOD  
ON CONTINUOUSLY OPERATING GNSS REFERENCE  
STATIONS IN THE REPUBLIC OF LEBANON**

<sup>1,2</sup>Akl M.N., <sup>1</sup>Polovnev O.V., <sup>1</sup>Nasereddin H.H.

<sup>1</sup>Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow,  
e-mail: maher.n.akl@gmail.com;

<sup>2</sup>Lebanese International University, Beirut

The article presents a study on the application of the Precise Point Positioning method for determining the geographic coordinates of Continuously Operating Reference Stations to update the geodetic network and predict crustal movements in Lebanon. Lebanon is located in a seismically active region, with two major geological faults and several local faults crossing its territory. Constant observations at global position system stations are required to determine crustal movements and changes in the positions of geodetic network points. Precise Point Positioning is a satellite positioning method that provides high accuracy without the need for nearby additional reference stations. Using Precise Point Positioning, survey engineers can determine precise geographic coordinates, thereby improving the overall accuracy of the geodetic network. The study emphasizes the importance of accurate geodetic coordinates for Continuously Operating Reference Stations in modernizing the satellite geodetic network, enhancing the reliability and efficiency of surveying methods, especially in areas prone to seismic and geodynamic activity. The study concludes that the Precise Point Positioning method does not meet the accuracy requirements for reference stations.

**Keywords:** geodetic network, seismic and geodynamic activity, global navigation satellite system, precise positioning, continuously operating reference stations

**Введение**

Создание устойчивой геодезической сети в Ливане является актуальной задачей. Актуальность обусловлена тем, что часть пунктов существующей геодезической сети

утрачена, и это нарушило целостность геодезического построения, а также наличие активной геодинамической составляющей на территории Ливана и близлежащих стран. Геодинамические процессы приводят к сни-

жению точности геодезических станций, что напрямую влияет на точность геодезических работ.

В статье предлагается модель создания новых высокоточных опорных станций в Ливане с использованием глобальных навигационных спутниковых систем (GNSS). Разработанный подход позволит быстро и точно определять координаты вновь устанавливаемых и непрерывно действующих опорных станций (CORS).

На пунктах CORS в режиме реального времени будут определяться координаты, это обеспечит непрерывный мониторинг движения земной коры на территории Ливана, позволит корректировать координаты опорных пунктов после сейсмических событий или других геодинамических процессов.

Предлагаемая модель применения позиционирования высокой точности (PPP – Precise Point Positioning) обеспечит высокоточное позиционирование и в дальнейшем, при создании соответствующего национального сервиса – определение и транслирование дифференциальных поправок на определяемые методом PPP пункты. Сеть опорных станций сыграет ключевую роль в модернизации геодезической инфраструктуры Ливана, повысит точность измерений и поддержит различные специализированные приложения, включая управление земельными ресурсами, инфраструктурой и в проведении научных исследований [1–3].

**Цель исследования** – изучение применения метода точного позиционирования для определения координат базовых станций непрерывного действия в целях обновления геодезической сети и прогнозирования движения земной коры.

Задачи:

1. Подробно описать поэтапный процесс реализации метода PPP – от выбора мест установки и монтажа станций до выполнения обработки данных для получения точных координат определяемого пункта.

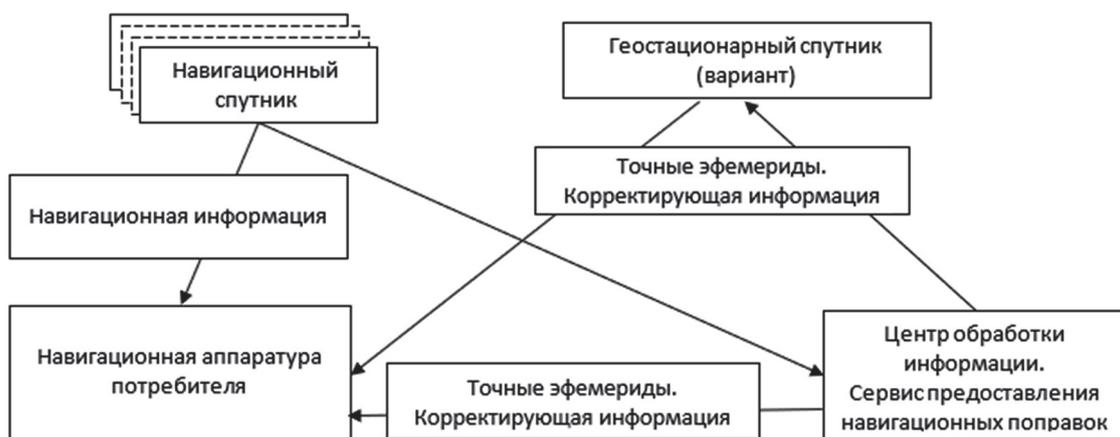
2. Определить соответствие метода позиционирования высокой точности требованиям, предъявляемым к точности опорных станций.

### Материалы и методы исследования

Исследование проводилось в Ливане, в частности в деревне Райак, расположенной недалеко от г. Баальбек на востоке страны. Этот район был выбран ввиду его стратегического значения и геологических особенностей, имеющих отношение к целям исследования. Близость Райака к Баальбеку создает оптимальные условия для мониторинга геодезических и геодинамических процессов в регионе.

В методе PPP выполняют обработку информации, полученной с одного приемника, с применением дополнительной информации о точных спутниковых орбитах, о поправках часов, а также с применением дополнительных математических моделей, учитывающих влияние различных геофизических и геодинамических факторов (рисунок).

При этом выполняется оценка положения самого приемника, решение неоднозначностей, выявление смещений часов приемника и определение задержки во влажной тропосфере. PPP служит широкому спектру приложений, таких как точное позиционирование, зондирование водяного пара в атмосфере, мониторинг землетрясений и цунами, определение орбиты низкоорбитальных спутников и точного земледелия [4, 5].



*Обзор системы точного позиционирования (PPP)*

*Источник: составлено авторами по результатам данного исследования*

Было проведено исследование применения PPP для определения пунктов CORS. Метод PPP опирается на прямые наблюдения и точные эфемериды. Прямые наблюдения – это данные, которые GPS-приемник может получить самостоятельно, основной информацией является фаза несущей, дополнительной является дифференциальная задержка между сигналами GNSS разных частот, поэтому в основном в данном методе используют двухчастотные приемники. Точные эфемериды – орбиты спутников GNSS, определяемые геодезическим сообществом с использованием глобальных сетей наземных станций. Существуют «ультрабыстрые» орбиты примерно через 90 мин наблюдений, «быстрые», которые формируются за день-два, и «окончательные», которые определяются примерно за 14 дней. По времени, необходимому на подготовку точных эфемерид, можно сделать вывод, что только первые можно использовать в режиме реального времени, а два других типа – только в режиме постобработки. Для предоставления точных эфемерид, поправок в бортовые часы используются специальные сервисы, которые государство может подготовить самостоятельно или использовать общемировые. В настоящее время вся информация, необходимая для реализации метода PPP получается от европейской станции распространения навигационной информации. Необходима национальная служба и соответствующие сервисы для полноценной реализации данного метода.

Типичному решению PPP требуется определенный интервал времени для достижения заданной точности, чтобы устранить локальные ошибки, такие как атмосферное влияние, многолучевое распространение радиоволн и смещение приемника в ходе сеанса наблюдения. Фактическая достигнутая точность и необходимое время сходимости зависят от качества поправок и от того, как они применяются в процессе обработки получаемого сигнала [6, 7].

Метод PPP работает по следующей схеме:

- наблюдения – получение приемником навигационной информации;
- получение от специальных сервисов точных эфемерид, поправок в часы, корректирующих моделей и других поправок;
- применение корректирующей информации в режиме реального времени или в режиме постобработки;
- оценка определяемых параметров, координат и полученных редуций фильтром

Калмана или методом наименьших квадратов в последовательной обработке [8].

Вектор определяемых параметров можно записать как

$$X = \begin{bmatrix} X_t \\ Y_t \\ Z_t \\ dt^t \\ T^t \\ N^t \end{bmatrix}, \quad (1),$$

где  $X_t, Y_t, Z_t$  – координаты приемника, обновляются с использованием фильтра Калмана;  
 $dt^t$  – смещение часов приемника, оценивается и корректируется с использованием точных данных о часах спутника;

$T^t$  – задержка в тропосфере, моделируется и оценивается с использованием фильтра Калмана;

$N^t$  – неопределенность фазы несущей, оценивается как плавающее значение, фиксируется как целое число в методе PPP-AR, с использованием фильтра Калмана.

– координаты приемника, определяются в геоцентрической системе координат на фиксированную эпоху. Метод PPP непрерывно уточняет координаты по мере поступления навигационной и эфемеридно-временной информации, до тех пор, пока не будет достигнута наилучшая возможная точность, процесс обработки завершается либо по достижении заданного периода времени, либо по завершению поступления навигационной информации от спутников;

– коррекция:

• часов приемников относительно часов спутников; в виде

$$P_i^t = \rho^t + c(dt^t - dt^s) \quad (2),$$

где  $c$  – скорость света,  $dt^t$  – смещение часов приемника,  $dt^s$  – смещение часов спутника.

Смещение часов приемника рассматривается как неизвестный параметр, а ошибки часов спутника ( $dt^s$ ) корректируются с использованием данных от IGS;

• тропосферной задержки:

$$T = T_{\text{«сухая»}} + T_{\text{«влажная»}}, \quad (3),$$

где  $T_{\text{сухая}}$  – «сухая» составляющая (примерно 90% от всей задержки, возможен расчет).

$T_{\text{влажная}}$  – «влажная» составляющая (примерно 10% от всей задержки, по моделям не рассчитывается). Если доступны данные о погоде в реальном времени, то коррекция может быть осуществлена в процессе обработки.

• неоднозначность измерения фазы несущей:

$$\Phi_i^t = \rho^t + c(dt^t - dt^s) - I_i^t + T^t + \lambda_i N_i^t + \varepsilon_\phi, \quad (4)$$

где  $\lambda_i$  – это длина волны сигнала GPS;  $N_i^t$  – разности фаз;  $\varepsilon_\phi$  – это фазовый шум / ошибка.

GPS-приемники измеряют фазу несущего сигнала, данный метод значительно точнее, чем измерения по кодовым псевдодальностям. Однако между спутником и приемником существует неизвестное целое число полных циклов, называемое тер-

$$P_{L_i} = \rho + d_{orb} + c(dT - dt) + d_{ion(L_i)} + d_{trop} + d_{hd(P_{L_i})}^r - d_{hd(P_{L_i})}^s + d_{multi(P_{L_i})} + d_{noise(P_{L_i})}, \quad (5)$$

$$\phi_{L_i} = \rho + d_{orb} + c(dT - dt) - d_{ion(L_i)} + d_{trop} - \lambda_{L_i} N_{L_i} + d_{hd(\phi_{L_i})}^r - d_{hd(\phi_{L_i})}^s + d_{multi(\phi_{L_i})} + d_{noise(\phi_{L_i})}, \quad (6)$$

где  $P_{L_i}$  и  $\phi_{L_i}$  – уравнения псевдодальности и фазы несущей соответственно, на частоте  $L_i$ ;  $\rho$  – геометрическое расстояние между спутником и приемником в метрах,  $d_{orb}$  – ошибка орбиты спутника в метрах,  $c$  – скорость света в вакууме, м/с;  $dT$  и  $dt$  – погрешность часов спутника и приемника соответственно, в секундах;  $d_{ion(L_i)}$  – ионосферное влияние первого порядка на частоту  $L_i$  в метрах;  $d_{trop}$  – задержка в тропосфере, в метрах;  $d_{hd(P_{L_i})}^r$  и  $d_{hd(P_{L_i})}^s$  – аппаратные задержки спутника и приемника для псевдодальности соответственно, на частоте  $L_i$ , в метрах;  $d_{hd(\phi_{L_i})}^r$  и  $d_{hd(\phi_{L_i})}^s$  – аппаратные задержки спутника и приемника соответственно, для фазы несущей  $L_i$ , в метрах;  $d_{multi(P_{L_i})}$  и  $d_{multi(\phi_{L_i})}$

минимум неоднозначности  $N^t$ , решение данной неоднозначности призвано сделать измерения точнее. Изначально  $N_i^t$  рассматривается как значение с плавающей запятой и оценивается с использованием фильтра Калмана. Если применяется разрешение неоднозначности (PPP-AR), оно фиксируется как целое число, что повышает точность до 1–5 см [9]. Функциональная модель PPP представляет собой явную связь между наблюдениями и неизвестными, недифференциальные уравнения наблюдений представлены в следующем виде [10]:

ошибки многолучевого распространения псевдодальности и фазы несущей соответственно, на частоте  $L_i$ , в метрах;  $d_{noise(P_{L_i})}$  и  $d_{noise(\phi_{L_i})}$  – шумовые ошибки псевдодальности и фазы несущей соответственно на частоте  $L_i$ , в метрах;  $N_{L_i}$  – целая неоднозначность фазы на частоте  $L_i$ , в циклах;  $\lambda_{L_i}$  – длина волны частоты  $L_i$ , в метрах.

Традиционные безионосферные линейные комбинации псевдодальности и фазы несущей являются наиболее известными наблюдаемыми величинами, используемыми для смягчения ионосферного эффекта первого порядка. Псевдодальность и свободная от ионосферы фаза несущей формируются в следующих уравнениях [7, 10, 11]:

$$P_{if} = \frac{f_1^2 P_1 - f_2^2 P_2}{f_1^2 - f_2^2} - \rho + d_{orb} + c(dT - dt) + d_{trop} + d_{hd(P_{if})}^r - d_{hd(P_{if})}^s + d_{multi(P_{if})} + d_{noise(P_{if})}, \quad (7)$$

$$\phi_{if} = \frac{f_1^2 \phi_1 - f_2^2 \phi_2}{f_1^2 - f_2^2} - \rho + d_{orb} + c(dT - dt) - \lambda_{if} N_{if} + d_{trop} + d_{hd(\phi_{if})}^r - d_{hd(\phi_{if})}^s + d_{multi(\phi_{if})} + d_{noise(\phi_{if})}, \quad (8)$$

где  $N_{if}$  – целочисленная неопределенность фазы без ионосферы, в циклах;  $\lambda_{if}$  – длина волны без задержки ионосферы, в метрах [12–14].

Основным преимуществом безионосферных комбинаций является исключение членов, учитывающих влияние ионосферы. Недостатком безионосферных линейных комбинаций является шум наблюдения, примерно в три раза превышающий шум на каждой из частот L1 или L2 [10].

Используя различные вариации метода наименьших квадратов, выполняют обра-

ботку измерений, постоянно дополняющихся информацией.

### Результаты исследования и их обсуждение

Изменение длительности сеанса коррелирует с точностью обработанных координат. Длительные наблюдения увеличивают вероятность разрешения неоднозначности и уменьшения влияния многолучевости распространения сигнала. В табл. 1 показана зависимость между продолжительностью сеанса наблюдений и точностью получаемых координат.

**Таблица 1**

Связь продолжительности наблюдения и точности измерения статического PPP

Продолжительность наблюдения, мин	Точность статического PPP с использованием смешанных наблюдений GPS/ГЛОНАСС, с вероятностью 95 %				
	у, (м)	х, (м)	h, (м)	В плане, (м)	Общая, (м)
10	0,629	0,843	1,283	1,052	1,659
20	0,256	0,322	0,475	0,411	0,628
30	0,146	0,171	0,275	0,225	0,355
45	0,088	0,092	0,168	0,127	0,211
60	0,064	0,060	0,131	0,088	0,158
90	0,040	0,037	0,093	0,054	0,108
120	0,024	0,028	0,065	0,037	0,075
150	0,016	0,021	0,051	0,026	0,057
180	0,011	0,018	0,042	0,021	0,047
240	0,008	0,013	0,029	0,015	0,033
360	0,005	0,010	0,020	0,011	0,023
480	0,004	0,008	0,015	0,009	0,017
600	0,003	0,006	0,013	0,006	0,014
720	0,002	0,005	0,011	0,005	0,012

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

**Таблица 2**

Географические координаты станций для решения PPP

Станция	Широта (DMS)	СКП, (м)	Долгота (DMS)	СКП, (м)	Геодезическая высота (м)	СКП, (м)
BUCU (Румыния)	44 27 50.20906	0,006	26 07 32.68616	0,007	143.242	0,013
DYNG (Греция)	38 04 42.78692	0,006	23 55 56.76703	0,006	510.567	0,012
GANP (Словакия)	49 02 04.97705	0,008	20 19 22.58736	0,009	746.034	0,021
GLSV (Украина)	50 21 51.06579	0,006	30 29 48.25773	0,006	226.320	0,013
GRAZ (Австрия)	47 04 01.67750	0,006	15 29 36.54842	0,006	538.284	0,012
JOZ2 (Польша)	52 05 52.21776	0,005	21 01 56.48478	0,006	152.517	0,012
MAT1 (Италия)	40 38 56.63516	0,008	16 42 16.38534	0,008	534.522	0,018
MEDI (Италия)	44 31 11.85708	0,006	11 38 48.55243	0,007	49.991	0,013
POLV (Украина)	49 36 09.41773	0,005	34 32 34.57052	0,007	178.337	0,013
SOFI (Болгария)	42 33 21.94803	0,008	23 23 41.05681	0,011	1119.502	0,016
ZECK (Россия)	43 47 18.22120	0,006	41 33 54.25995	0,007	1166.296	0,013

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

**Таблица 3**

Точность геодезических сетей в Ливане

Класс	Назначение	Точность в плане, мм	Точность по высоте, мм
Первый класс	Национальная опорная основа	5	10
Второй класс	Региональный контроль и сгущение сети	10	15
Третий класс	Обеспечение картографирования	25	30
Четвертый класс	Для обеспечения инженерных и кадастровых работ	50	60

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

В табл. 2 показаны данные постоянно действующих станций IGS (<https://network.igs.org/>), которые использовались для получения решения PPP.

В Ливане геодезическая сеть подразделяется на четыре основных класса по точности, как показано в табл. 3.

### Выводы

При проектировании геодезической сети необходимо определить требуемый уровень точности, чтобы выбрать наилучший метод PPP для достижения необходимой точности пунктов создаваемой сети CORS.

Исследование показало:

1. Применение метода PPP позволяет добиться точности второго класса, с последующим уравниванием.

2. Используемые для реализации метода PPP станции IGS находятся на значительном удалении и поэтому не позволяют достичь точности геодезической сети первого класса, этот метод можно использовать для создания пунктов геодезической сети второго, третьего и четвертого классов.

На основании полученных данных сформулированы следующие рекомендации по применению станций CORS в Ливане:

– обеспечить равномерное покрытие территории страны станциями CORS;

– методика модернизации геодезической сети первого класса может использовать данные определенные пункты только как предварительные с последующим уравниванием для достижения необходимой точности;

– уравниваемую сеть первого класса использовать как основу для создания сетей младших классов, уменьшая, таким образом, расстояние до базовых станций при применении метода PPP;

– создать свой сервер по определению поправок для обслуживания потребителей, использующих «быстрый» метод PPP.

### Список литературы

1. Акл М.Н. Элементы методики модернизации спутниковой геодезической сети в геологически неустойчивом районе // Успехи современного естествознания. 2023. № 6. С. 113–121. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/>

[view?id=38061](#) (дата обращения: 18.07.2025). DOI: 10.17513/use.38061.

2. Madani S.A., Sadoun B., Al-Bayari O. Continuously operating reference station and surveying applications in KSA // International Journal of Communication Systems. 2015. Vol. 29, Is. 6. P. 1046–1056. DOI: 10.1002/dac.3035.

3. Angrisano A., Dardanelli G., Innac A., Pisciotta A., Pipitone C., Gaglione S. Performance assessment of PPP surveys with open source software using the GNSS GPS-GLONASS-Galileo constellations // Applied Sciences (Switzerland). 2020. Vol. 10, Is. 16. P. 5420. DOI: 10.3390/app10165420.

4. Jin S., Su K. PPP models and performances from single-to quad-frequency BDS observations // Satellite Navigation. 2020. Vol. 1. P. 16. DOI: 10.1186/s43020-020-00014-y.

5. Geoscience Australia. AUSPOS – Online GPS Processing Service. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ga.gov.au/scientific-topics/positioning-navigation/positioning-australia/geodesy/auspos> (дата обращения: 05.07.2025).

6. Ge M., Gendt G., Rothacher M., Shi C., Liu J. Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in Precise Point Positioning (PPP) with daily observations // Journal of Geodesy. 2008. Vol. 82. P. 389–399. DOI: 10.1007/s00190-007-0187-4.

7. Qafisheh M., Martín A., Capilla R., Julián A. SVR and ARIMA models as machine-learning solutions for solving the latency problem in real-time clock corrections // GPS Solutions. 2022. Vol. 26, Is. 3. P. 85. DOI: 10.1007/s10291-022-01270-y.

8. Budimirov T., Bulatović V., Marković M., Batilović M., Sušić Z. Precise Point Positioning – PPP method // Civil Engineering – Science & Practice” (GNP 2022). Proc. 8th Int. Conf. (Kolašin, Montenegro, 8–12 March 2022). P. 891–898. URL: <https://repository.ukim.mk/bitstream/20.500.12188/29647/1/GNP%20Proceedings%202022%202.pdf> (дата обращения: 25.06.2025). ISBN: 9788682707356.

9. Wang G. Millimeter-accuracy GPS landslide monitoring using Precise Point Positioning with Single Receiver Phase Ambiguity (PPP-SRPA) resolution: a case study in Puerto Rico // Journal of Geodetic Science. 2013. Vol. 3, Is. 1. P. 22–31. DOI: 10.2478/jogs-2013-0001.

10. Zumberge J.F., Hefflin M.B., Jefferson D.C., Watkins M.M., Webb F.H. Precise Point Positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 1997. Vol. 102, Is. B3. P. 5005–5017. DOI: 10.1029/96JB03860.

11. Zumberge J.F., Watkins M.M., Webb F.H. Characteristics and applications of precise GPS clock solutions every 30 seconds // Navigation. 1997. Vol. 44, Is. 4. P. 449–456. DOI: 10.1002/j.2161-4296.1997.tb02360.x.

12. Abou-Galala M., Rabah M., Kaloop M., Zidan Z. Assessment of the accuracy and convergence period of Precise Point Positioning // Alexandria Engineering Journal. 2018. Vol. 57, Is. 3. P. 1721–1726. DOI: 10.1016/j.aej.2017.04.019.

13. Budimirov T., Bulatović V. Performance analysis of PPP positioning method by using IGS real-time service // Geodetski Vestnik. 2018. Vol. 62, Is. 4. P. 604–618. DOI: 10.15292/geodetski-vestnik.2018.04.604-618.

14. Marques H.A., Marques H.A.S., Aquino M., Veettil S.V., Monico J.F.G. Accuracy assessment of Precise Point Positioning with multi-constellation GNSS data under ionospheric scintillation effects // Journal of Space Weather and Space Climate. 2018. Vol. 8. P. A15. DOI: 10.1051/swsc/2017043.

УДК 624.131.1  
DOI

## ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ НАБЕРЕЖНОЙ ПРАВОГО БЕРЕГА РЕКИ НЕВЫ В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ

Лебедева Я.А., Алексеев И.В., Котюков П.В., Ланге И.Ю., Уксусова Е.С.

*ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», Санкт-Петербург,  
e-mail: Lebedeva\_YaA@pers.spmi.ru*

В статье изучен исторический аспект освоения прибрежной территории в Невском районе Санкт-Петербурга. Описаны основные этапы формирования современного облика Октябрьской набережной. Рассмотрены методы и методики изучения горных пород и подземных вод в соответствии с действующими нормативными документами. На основе полевых наблюдений проведена оценка технического состояния конструкций набережной, требующей проведения капитального ремонта. Выявлены ключевые виды деформаций откосной части, верхнего и нижнего банкетов: дефекты диабазовой кладки, коррозия металлических элементов и смещение блоков нижнего банкета. Двухэтапный мониторинг (2024–2025 гг.) подтвердил прогрессирующий характер повреждений. Произведена оценка инженерно-геологической и гидрогеологической специфики рассматриваемого участка. Проанализирован химический состав водоносных горизонтов в разрезе набережной и поверхностных вод р. Невы. Выявлена повышенная минерализация подземных вод (до 1985 мг/дм<sup>3</sup>) и установлено их агрессивное воздействие на материалы конструкций, обусловленное техногенным загрязнением. В статье систематизированы опасные инженерно-геологические процессы: подтопление, тиксотропия, пльвунообразование, суффозия, оползневые смещения, биохимическая коррозия и газообразование. Выполнен расчет устойчивости откоса с учетом гидродинамического давления, показавший критическое значение коэффициента запаса (1,0–1,2). В качестве меры противодействия предложено заглубление железобетонных свай в моренные отложения (глубина > 25 м), обладающих повышенной несущей способностью.

**Ключевые слова:** набережная, откос, песчано-глинистые грунты, инженерно-геологические процессы, химический состав воды, оползневые деформации, устойчивость

## ENGINEERING-GEOLOGICAL ANALYSIS OF THE CURRENT STATE OF THE EMBANKMENT STRUCTURES OF THE RIGHT BANK OF THE NEVA RIVER IN SAINT PETERSBURG

Lebedeva Ya.A., Alekseev I.V., Kotyukov P.V., Lange I.Yu., Uksusova E.S.

*Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, e-mail: Lebedeva\_YaA@pers.spmi.ru*

The article studies the historical aspect of the development of the coastal territory in the Nevsky district of St. Petersburg. The main stages of the formation of the modern appearance of Oktyabrskaya Embankment are described. The methods and techniques for studying rocks and groundwater in accordance with current regulatory documents are considered. Based on field observations, an assessment of the technical condition of the embankment structures requiring major repairs was carried out. The key types of deformations of the slope part, upper and lower banquettes were identified: defects in diabase masonry, corrosion of metal elements and displacement of the lower banquet blocks. Two-stage monitoring (2024–2025) confirmed the progressive nature of the damage. An assessment of the engineering-geological and hydrogeological specifics of the site under consideration was made. The chemical composition of aquifers in the section of the embankment and surface waters of the Neva River was analyzed. Increased mineralization of groundwater (up to 1985 mg/dm<sup>3</sup>) was revealed, and its aggressive impact on structural materials caused by technogenic pollution was established. The article systematizes dangerous engineering and geological processes: flooding, thixotropy, quicksand formation, suffusion, landslide displacements, biochemical corrosion and gas formation. The slope stability calculation was performed taking into account hydrodynamic pressure, which showed a critical value of the safety factor (1.0–1.2). As a countermeasure, it was proposed to deepen reinforced concrete piles into moraine deposits (depth > 25 m), which have an increased bearing capacity.

**Keywords:** embankment, slope, sandy-clay soils, water chemical composition, engineering-geological processes, landslide deformations, stability

### Введение

Город Санкт-Петербург, признанный объект всемирного наследия ЮНЕСКО, славится уникальным архитектурным ансамблем, где набережные рек и каналов играют ключевую роль в формировании городского ландшафта. Их общая протяженность превышает 150 км, а безопасность функционирования исторических конструкций, создан-

ных в XVIII–XX вв., сегодня определяется возрастающими техногенными нагрузками и естественным старением [1; 2]. В рамках программы «Водный каркас», инициированной администрацией города, ведется масштабная реконструкция и капитальный ремонт набережных города, направленный на сохранение культурного наследия и адаптацию инфраструктуры к современ-

ным требованиям [1]. К 2025 г. в городе уже обустроено более 40 км набережных, 60 км планируется реконструировать в ближайшее время [1]. Обсуждается необходимость разработки проекта непрерывной линии благоустроенных набережных и прилегающих к ним общественных пространств [1–3]. В настоящий момент ряд объектов характеризуется критическим состоянием несущих конструкций, неудовлетворительным качеством облицовки, что ставит под сомнение их устойчивость и безопасность дальнейшей эксплуатации.

К одному из таких объектов относится Октябрьская набережная, расположенная на правом берегу р. Невы в юго-восточной части Санкт-Петербурга, которая является самой протяженной (9 км) в городе и имеет статус объекта культурного наследия регионального значения. Свое современное название набережная получила в 1973 г. в честь Октябрьской революции. Вдоль набережной размещены жилые, общественные здания, а также промышленные сооружения.

Освоение правого берега Невы относится еще к допетровскому периоду и ведет свой отсчет с XV в. В это время в непосредственной близости от набережной размещались поселки и сельскохозяйственные угодья. Позднее, в XVIII–XIX вв., в рассматриваемом районе возникли предприятия легкой промышленности, заводы стройматериалов [4]. В начале XX в. на обоих берегах Невы располагались фабричное производство, кирпичные и деревообрабатывающие заводы.

Промышленное назначение Октябрьской набережной предопределило ее облик, формирование которого относится к 1930-м гг. Уникальная криволинейная конструкция, разработанная архитектором К.М. Дмитриевым и инженером Г.К. Усовым, отличается от типовых решений того периода (вертикальных стенок): наклонная стенка устроена на нижнем бетонном банкете и опирается на деревянный свайный фундамент с низким ростверком (рис. 1) [4–6].

Однако многовековая эксплуатация в условиях высокой антропогенной нагрузки (промышленные предприятия, транспорт, инженерные коммуникации) привела к появлению ряда дефектов, связанных с разрушением бетонного защитного слоя, коррозией металлических элементов, смещением откосной части [7].

Вместе с тем обеспечение длительной устойчивости набережных должно базироваться на комплексной оценке особенно-

стей инженерно-геологических условий изучаемой территории, в том числе: состава, состояния и показателей физико-механических свойств грунтов в разрезе основания, содержания компонентов в подземных водах и степени агрессивности по отношению к конструкционным материалам.

**Целью исследования** является анализ причин разрушения конструкций Октябрьской набережной на основе комплексной оценки сложности инженерно-геологических и гидрогеологических условий разреза при высокой контаминации подземной среды.

#### **Материалы и методы исследования**

Исследование Октябрьской набережной выполнено на основе комплекса полевых и расчетных методов. Для оценки физико-механических свойств грунтов летом 2024 г. были отобраны образцы пород в соответствии с требованиями ГОСТ 12071-2014 («Грунты. Отбор, упаковка, транспортирование и хранение образцов»). Лабораторные исследования проводились по стандартам ГОСТ 5180-2015 (определение плотности и влажности грунтов), ГОСТ 12248-2020 (испытания на сдвиг). Изучение химического состава подземных и поверхностных вод осуществлялось согласно ГОСТ Р 59024-2020 («Вода. Общие требования к отбору проб») и ГОСТ 31954-2012 (анализ химического состава воды). Обоснование возможности развития оползневых процессов проводилось на основе расчетов устойчивости по методу алгебраического суммирования с учетом гидростатического давления и гидродинамического воздействия воды.

Кроме того, летом 2023 г. производился осмотр конструкций Октябрьской набережной, который выявил их неудовлетворительное состояние, сформировавшееся уже после проведения последнего капитального ремонта в 1999 г. Полевые обследования включали визуальный осмотр состояния наземных конструкций набережной с последующей фотофиксацией их разрушения. Исследованиям подвергался участок протяженностью 700 м. Визуальные наблюдения зафиксировали следующие виды разрушений: 1) трещины и сколы в бетонном защитном слое нижней стенки; 2) деформации чугунных решеток; 3) разрушение расшивки швов диабазового мощения с образованием провалов; 4) следы коррозии и биокоррозии конструкционных материалов; 5) искри-

вление перильного ограждения в профиле и в плане вследствие дефектов бетонных блоков основания. Асфальтовое покрытие тротуара характеризовалось сеткой трещин и локальными выбоинами. Выполненное обследование подтвердило необходимость проведения капитального ремонта, включающего работы по восстановлению внешнего облика набережной: демонтаж и замену облицовки и блоков перильного ограждения, реконструкцию силовых элементов опорной стенки совместно со сваями и ростверком [7; 8].

Непосредственно авторами статьи был выполнен мониторинг состояния конструкции набережной осенью 2024 г. и весной 2025 г. с последующей фотофиксацией. Обследование фрагмента набережной показало, что деформации берегозащитного сооружения продолжают развиваться, приводя к постепенному разрушению ее несущих конструкций. При осмотре были отмечены:

1) наклон парапета, для устранения которого выполнены металлические подпоры к ограждению надводной части (рис. 1, а); 2) высолы цементного раствора (рис. 1, б); 3) фильтрация воды через разрушенный нижний банкет (рис. 1, в); 4) горизонтальные смещения диабазовой кладки и выдавливание грунтов в нижней части откоса (рис. 1, г); 5) разрушение и неравномерные деформации верхнего банкета (рис. 1, д); 6) формирование трещин в асфальтовом покрытии тротуара (рис. 1, е).

Специализированная съемка, выполненная для оценки состояния существующего свайного поля, выявила снижение несущей способности деревянных свай в нижней части набережной ввиду их частичного разрушения. В связи с этим необходима разработка новых конструктивных решений для обеспечения устойчивости откоса и безопасного функционирования берегозащитного сооружения [9; 10].

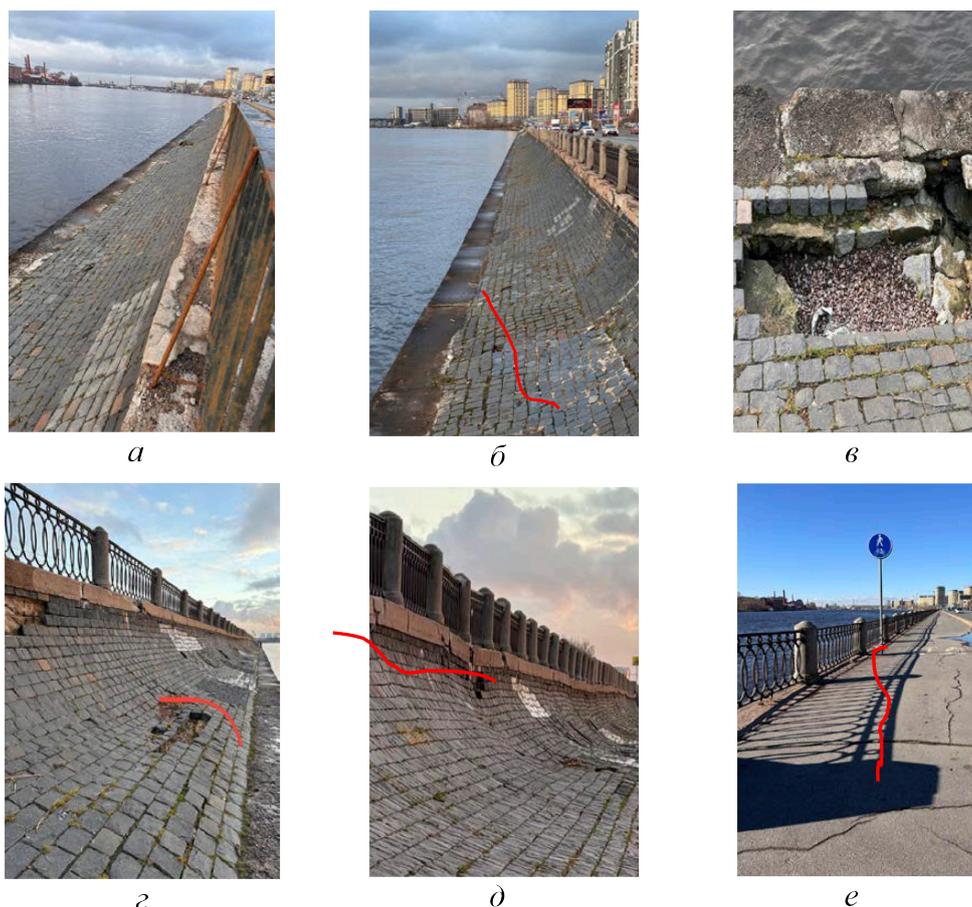


Рис. 1. Виды разрушений несущих конструкций откоса набережной:  
 а – опорный раскос ограждения; б – высолы цементного раствора на кладке набережной;  
 в – фильтрация воды через разрушенный нижний банкет, г – горизонтальные смещения диабазовой  
 кладки; д – неравномерные деформации верхнего банкета; е – трещины в асфальтовом покрытии  
 Источник: составлено авторами в 2024–2025 гг.

### Результаты исследования и их обсуждение

Рассматривая неудовлетворительное состояние конструкций набережной, необходимо проанализировать возможные причины ее прогрессирующего разрушения. Как показывают исследования профессора Санкт-Петербургского горного университета докт. геол.-мин. наук Р.Э. Дашко, выполненные в начале XX в. в рамках реконструкции Петровской набережной, для подобных объектов необходимо, прежде всего, изучать специфику инженерно-геологических и гидрогеологических условий с учетом исторического аспекта освоения территории [11; 12].

Октябрьская набережная располагается в пределах низкой Литориновой террасы, абсолютные отметки которой до инженерной подготовки территории не превышали 1 м. Ввиду ее постоянного затопления производилась отсыпка техногенных грунтов в приоткосной части: в нижней – супесями, в верхней – песками крупно- и среднезернистыми. В результате инженерной подготовки территории современные отметки дневной поверхности достигли 3,6–4,0 м.

В геологическом строении рассматриваемой территории принимают участие четвертичные и дочетвертичные образования различного генезиса. Грунты дочетвертичной толщи залегают на глубине более 40 м [13]. Выше вскрываются отложения москов-

ской морены, нерасчлененные флювиогляциальные и озерно-ледниковые грунты, микулинские разности, ошашковская морена, перекрытая озерно-ледниковыми и озерно-морскими отложениями. Завершают разрез техногенные разности, представленные песками средней крупности и супесями с включением щебня, строительного мусора и примесью органических остатков.

Гидрогеологические особенности рассматриваемой территории характеризуются наличием нескольких водоносных горизонтов. Наибольшее значение в вопросах устойчивости откоса играют грунтовые и поверхностные воды. Водоносный горизонт грунтовых вод приурочен к техногенным пескам и супесям. Вода пресная, по величине минерализации близкая к ультрапресной от 248,7 до 250,7 мг/дм<sup>3</sup>, имеет гидрокарбонатный кальциевый состав (табл. 1).

Результаты химического анализа показывают схожесть состава грунтовых вод с водами р. Невы, что указывает на гидравлическую связь, обусловленную дефектами существующей конструкции набережной (рис. 1, в) или некорректным отбором проб. Повышение концентрации иона кальция Ca<sup>2+</sup> и сульфат-иона SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> связано с их поступлением из материалов разрушенных конструкций, в том числе бетона и цемента диабазовой кладки, что подтверждается многочисленными наблюдениями высолов на откосе (рис. 1, б).

Таблица 1

Результаты химического состава воды в пределах Октябрьской набережной

Компонентный состав	Октябрьская набережная, д. 44			Октябрьская набережная, д. 8 (1976 г.)
	Грунтовые воды		р. Нева	
Mg <sup>2+</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	8,0	9,0	8,0	<b>178</b>
Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	15,4	16,4	22,6	<b>253</b>
Ca <sup>2+</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	39,8	<b>37,0</b>	<b>31,6</b>	<b>292</b>
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	145,6	142,0	128,5	<b>500</b>
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	18,4	<b>19,7</b>	<b>21,8</b>	<b>1179</b>
Cl <sup>-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	20,8	21,6	25,1	<b>71</b>
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	1,15	1,22	1,1	3,0
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	0,02	0,02	0,02	2,5
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	<b>0,2</b>	<b>0,16</b>	<b>0,24</b>	сл.
Fe <sup>2+</sup> +Fe <sup>3+</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	<b>1,4</b>	<b>1,6</b>	<b>1,5</b>	<b>0,5</b>
Минерализация, мг/дм <sup>3</sup>	250,7	248,7	240,4	<b>2479</b>
Общая жесткость, мг-экв/дм <sup>3</sup>	2,65	2,59	2,24	<b>14,7</b>
Окисляемость, мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup> (перм.)	30,9	<b>32,6</b>	<b>35,1</b>	<b>32</b>
CO <sub>2</sub> агрес., мг/дм <sup>3</sup>	15,4	10,7	10,3	<b>нет</b>
pH	7,1	7,3	6,9	7,1

Источник: составлено авторами.

Обращает на себя внимание величина перманганатной окисляемости (30 мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup> при фоновых значениях 15 мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>) [14, с. 169–165; 15], повышенное содержание иона аммония, сульфатов и хлоридов, свидетельствующих о загрязнении утечками канализационных стоков.

Известно, что откос набережной вмещает значительное количество инженерных сетей и коммуникаций, которые в пределах исторического центра характеризуются неудовлетворительным состоянием. Утечки из систем водоотведения являются одним из основных техногенных источников поступления органики и приводят к формированию анаэробных условий, вызывающих преобразование свойств грунтов, трансформацию химического состава воды и рост агрессивности подземной среды [16]. Негативная роль канализационной системы подтверждается данными химического состава воды в пределах Октябрьской набережной, д. 8.

Безопасность функционирования и длительная устойчивость набережной определяется спецификой состава, состояния и физико-механических свойств грунтов,

которые служат основанием для ее конструкций. Согласно проекту сваи располагаются на глубине 5 м в разных геолого-литологических типах грунтов: озерно-морских, озерно-ледниковых и локально в моренных отложениях.

Разрез основания весьма изменчив, что подтверждается неодинаковой глубиной положения кровли четвертичных пород. Так, толща озерно-морских грунтов залегает на глубинах от 3,5 до 4,2 м, озерно-ледниковых – от 1,8 до 6,6 м, моренных отложений – от 0,4 до 12,0 м. Отложения характеризуются неустойчивым физическим состоянием и пестрым гранулометрическим составом.

Анализ физико-механических свойств грунтов позволил выявить участки с наибольшими деформациями откоса, сопровождающимися формированием трещин в асфальтовом покрытии тротуара. Такие зоны оказались приурочены к областям развития мощной толщи слабых глинистых грунтов. Описание геологического строения и показателей свойств типового участка приведено в табл. 2 и на рис. 2.

Таблица 2

Показатели свойств глинистых грунтов в разрезе потенциально оползнеопасного участка склона

Генезис отложений	Тип грунта	Влажность, W	Плотность, ρ, г/см <sup>3</sup>	Коэффициент пористости, e	Параметры прочности	
					Угол внутреннего трения, град	Сцепление, МПа
техногенные грунты t IV	Пески средней крупности со строительным мусором	0,07	1,97	–	11	0,002
	Супеси песчанистые пластичные со строительным мусором, с примесью органических веществ	0,24	1,96	–	12	0,002
озерно–морские m, l H	Суглинки легкие пылеватые тугопластичные	0,282	1,97	0,770	19	0,017
	Суглинки легкие пылеватые текучепластичные	0,287	1,95	0,786	16	0,011
	Суглинки легкие пылеватые текучие	0,322	1,93	0,884	9	0,011
моренные g III	Суглинки легкие пылеватые тугопластичные с гравием 5%	0,208	2,06	0,585	22	0,074

Источник: составлено авторами.

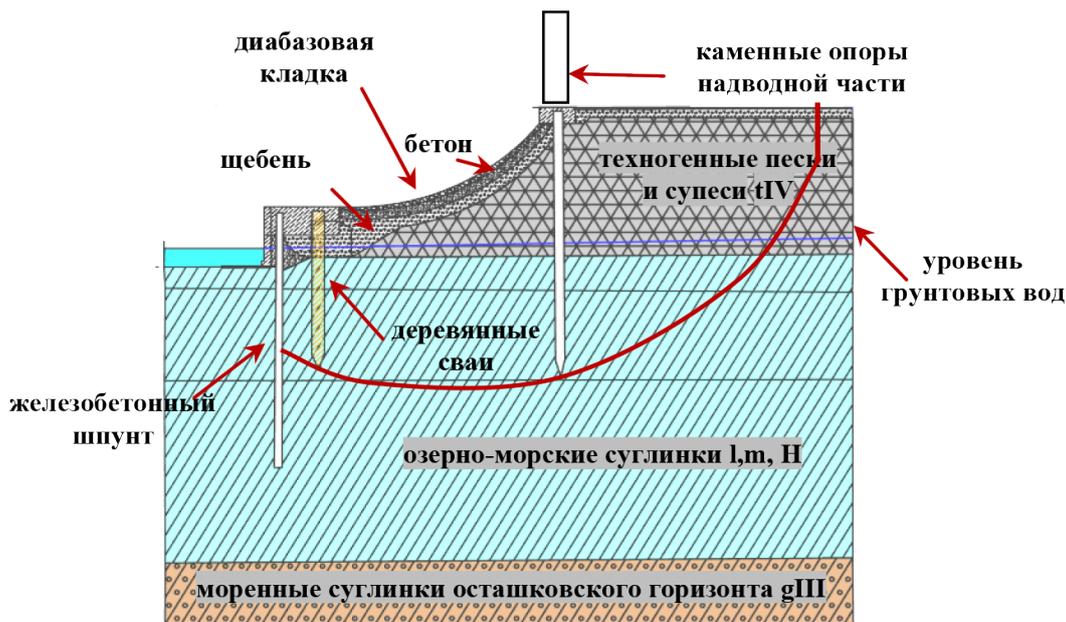


Рис. 2. Схематический геолого-литологический разрез типовой конструкции откоса набережной с обозначением поверхности скольжения  
 Источник: составлено авторами

В верхней части разрез представлен суглинками легкими пылеватыми, содержащими органику в количестве от 0,3 до 0,5%. С глубиной отмечается возрастание их влажности (от 0,282 до 0,322), снижение плотности и увеличение коэффициента пористости. Такая зависимость свидетельствует о разуплотнении грунтов в нижней части толщи. Показатели прочности озерно-морских отложений закономерно уменьшаются с глубиной при переходе от тугопластичной консистенции к текучей: угол внутреннего трения снижается с 19 до 9°, сцепление уменьшается от 0,017 до 0,011 МПа. Следует учитывать, что озерно-ледниковые суглинки текучей консистенции ( $e = 0,884$ ) обладают склонностью к тиксотропному разупрочнению при динамических нагрузках.

Нижняя часть разреза сложена моренными грунтами ошашковского горизонта, которые, несмотря на высокое сцепление (0,074 МПа), подвержены биохимической деградации, что подтверждается микробиологическими исследованиями (микробный белок – до 344 мкг/г). Показатели их механических свойств значительным образом зависят от окислительно-восстановительных условий и микробной пораженности. В условиях анаэробной среды происходит разрушение цементационных связей, и морены переходят в неустойчивое состояние

[16]. Это приводит к снижению их прочности, что должно быть принято во внимание при решении вопросов, связанных с устойчивостью откоса набережной [7].

Большое значение для устойчивости конструкций имеют различные инженерно-геологические процессы, развивающиеся в пределах набережной [17]. Среди потенциально опасных в пределах исследуемого участка можно выделить: тиксотропное разжижение грунтов, плывунообразование, подтопление, суффозию, оползневые деформации, биохимическое газообразование, коррозию и биокоррозию. На основании анализа возможности развития процесса составлена табл. 3.

Наиболее значимый процесс, формирование которого отмечается в пределах всего откоса набережной, – оползневые деформации [18]. Как показали визуальные наблюдения, дорожное полотно в пределах тротуарной зоны покрыто многочисленными трещинами, присутствуют локальные проседания поверхности, в дорожном покрытии формируются выбоины. Наиболее заметно изменилась конфигурация диабазовой кладки. Исходя из анализа мониторинговых наблюдений, можно сделать вывод, что в пределах набережной продолжается развитие неравномерных деформаций глинистых грунтов, залегающих в основании откоса. Это дает возможность полагать, что состояние набережной в целом неудовлетворительное.

Таблица 3

Сводная таблица опасных инженерно-геологических процессов в откосе набережной

Процесс	Грунты		Результат процесса
	Генезис	Описание	
Тиксотропное разжижение	Озерно-морские (m, l H), озерно-ледниковые (lg III),	Суглинки легкие пылеватые с растительными остатками слоистые, а также суглинки, супеси ленточные	Снижение прочности и устойчивости при динамическом воздействии
Плывунообразование	Озерно-морские (m, l H)	Пески пылеватые плотные серые, насыщенные водой	При вскрытии выработками переходят в неустойчивое состояние, развитие неравномерных деформаций дневной поверхности
Суффозия	Техногенные (t IV)	Пески средне- и крупнозернистые, насыщенные водой	Не реализуется ввиду низких градиентов фильтрации и $C_u < 5$
	Озерно-морские (m, l H)	Пески пылеватые плотные серые, насыщенные водой	
Подтопление	Техногенные (t IV), озерно-морские (m, l H)	Пески средне- и крупнозернистые, насыщенные водой	Подъем уровня грунтовых вод, изменение НДС грунтов
Оползневые деформации	Озерно-морские (m, l H), озерно-ледниковые (lg III), морены ошашковского горизонта (g III)	Суглинки легкие пылеватые с растительными остатками, слоистые, а также суглинки, супеси ленточные, суглинки легкие пылеватые тугопластичные с гравием 5%	Потеря устойчивости конструкций набережной с последующим разрушением
Коррозия и биокоррозия	Озерно-морские (m, l H), озерно-ледниковые (lg III), морены ошашковского горизонта (g III)	Вся толща песчано-глинистых пород в разрезе	Преждевременное разрушение материалов конструкций в основании откоса набережной и ее облицовки
Биохимическое газообразование	Морские микулинские (m III mk)	Суглинки легкие пылеватые твердые темно-серые слоистые с примесью органических веществ	При вскрытии может отмечаться выделение газов с редкими газо-грязевыми выбросами

Источник: составлено авторами.

Согласно данным визуального осмотра набережной, идет активное формирование оползневой поверхности (рис. 2). В соответствии с СП 420.1325800.2018 Приложение Д, предполагается, что оползневой процесс находится на стадии начального периода проявления, так как образуются трещины растяжения и происходит оседание дневной поверхности [19].

Проведенные исследования выявили критическое состояние Октябрьской набережной, обусловленное комплексом инженерно-геологических, гидрогеологических и техногенных факторов. Расчеты устойчивости откоса показали, что коэффициент запаса варьируется в пределах 1,0–1,2, что соответствует его предельному равновесию. Основной причиной деформаций стали слабые глинистые грунты озерно-морского и озерно-ледникового генезиса, угол

внутреннего трения которых менее  $5^\circ$  в условиях тиксотропного+ разупрочнения при динамических нагрузках. Существенную роль в деградации конструкций играет высокая агрессивность подземных вод, характеризующихся высокой минерализацией и повышенным содержанием сульфатов, что интенсифицирует коррозию бетона и металлических элементов, способствует разрушению свай, цементного раствора диабазовой и бутовой кладки. Дополнительным фактором риска является прогрессирующая контаминация грунтов органическими и химическими загрязнителями, приводящая к снижению их прочностных свойств и активизации опасных процессов, таких как оползни и биохимическое газообразование. Кроме того, следует принимать во внимание отсутствие дренажной системы.

Учитывая планируемое строительство нового моста через р. Неву и ожидаемый рост транспортной нагрузки, ключевой мерой обеспечения устойчивости набережной является замена деревянных свай железобетонными с заглублением в моренные отложения московского горизонта (глубина > 25 м), обладающие повышенной несущей способностью ( $\varphi = 22^\circ$ , сцепление 0,074 МПа).

### Заключение

Полученные результаты имеют практическую значимость для реконструкции аналогичных набережных Санкт-Петербурга в рамках программы «Водный каркас», а также могут быть использованы для разработки превентивных мер по сохранению объектов культурного наследия в условиях мегаполиса.

### Список литературы

- Кузнецова Е. Как развивается «водный каркас» Петербурга: репортаж // Новостной канал «Санкт-Петербург». 20.07.2024. [Электронный ресурс]. URL: <https://tvspb.ru/news/2024/07/20/kak-razvivaetsya-vodnyj-karkas-peterburga?ysclid=ma3922pa1e181437269> (дата обращения: 20.05.2025).
- Савельев М.В., Киселева Д.А., Бондарь Н.В., Пигин Ю.А. Принципы формирования городских общественных рекреационных зон набережных территорий // Вестник Томского государственного университета. Культурология и искусствоведение. 2019. № 33. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/printspiy-formirovaniya-gorodskih-obschestvennyh-rekreatsionnyh-zon-naberezhnyh-territoriy> (дата обращения: 26.06.2025).
- Сидорова В.В., Живица В.В., Суворов А.И., Эрайзер А.А. Принципы реконструкции общественных пространств в границах прибрежных территорий, на примере пгт. Черноморское республики Крым // Строительство и техногенная безопасность. 2021. № 22 (74). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/printspiy-rekonstruktsii-obschestvennyh-prostranstv-v-granitsah-pribeznyh-territoriy-na-primere-pgt-chemomorskoe-respubliki-krym> (дата обращения: 26.06.2025).
- Кочедамов В.И. Набережные Невы. Л.: Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре, 1954. 180 с.
- Картунов П.А. Потенциал устройства контактных набережных вдоль акватории Санкт-Петербурга // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2019. № 12–2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/potentsial-ustroystva-kontaktnykh-naberezhnyh-vdol-akvatorii-sankt-peterburga> (дата обращения: 26.06.2025).
- Подпорина П.С., Смолина О.О. Анализ современных подходов к функциональному зонированию набережных и их предметно-пространственному наполнению // Вестник ТГАСУ. 2024. № 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-sovremennykh-podhodov-k-funktsionalnomu-zonirovaniyu-naberezhnyh-i-ih-predmetno-prostranstvennomu-napolneniyu> (дата обращения: 26.06.2025).
- Сарафанова О.Ю. Устранение физического износа стенок набережных Санкт-Петербурга // StudArctic forum. 2018. № 1 (9). С. 9. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ustranenie-fizicheskogo-iznosa-stenok-naberezhnyh-sankt-peterburga> (дата обращения: 02.06.2025).
- Хасанов Р.Р., Киносьян Н.С. Подходы к архитектурно-градостроительной организации набережной им. Табеева в набережных Челнах // Известия КазГАСУ. 2019. № 1 (47). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/podhody-k-arhitekturno-gradostroitelnoy-organizatsii-naberezhnoy-im-tabeeva-v-naberezhnyh-chelnah> (дата обращения: 26.06.2025).
- Акт по результатам государственной историко-культурной экспертизы раздела документации, обосновывающей меры по обеспечению сохранности объекта культурного наследия регионального значения «Октябрьская набережная» [Электронный ресурс]. URL: [https://kgiop.gov.spb.ru/media/uploads/userfiles/2023/06/16/1\\_kCluMcv.pdf](https://kgiop.gov.spb.ru/media/uploads/userfiles/2023/06/16/1_kCluMcv.pdf) (дата обращения: 13.06.2025).
- Мотова Ю.О., Кулеева Л.М. Особенности современных приемов формирования набережных // Известия КазГАСУ. 2018. № 4 (46). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-sovremennykh-priemov-formirovaniya-naberezhnyh> (дата обращения: 14.05.2025).
- Гельфонд А.Л. Архитектурные аспекты преобразования бывших портовых территорий // Academia. Архитектура и строительство. 2022. № 3. С. 40–50. DOI: 10.22337/2077-9038-2022-3-40-50.
- Захарова Е.Г. Анализ деформации и расчет устойчивости набережной Петровского стадиона // Записки горного института. 2002. Т. 150. Ч. 1. С. 22–26. URL: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/9518> (дата обращения: 14.05.2025).
- Дашко Р.Э., Лохматиков Г.А. Верхнекотлинские глины Санкт-Петербургского региона как основание и среда уникальных сооружений: инженерно-геологический и геотехнический анализ // Записки Горного института. 2022. Т. 254. С. 180–190. DOI: 10.31897/PMI.2022.13.
- Горская В.А. Инженерно-геологический анализ исторического аспекта освоения и загрязнения подземного пространства Санкт-Петербурга: специальность 25.00.08 «Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение»: дис. ... канд. геол.-мин. наук. Санкт-Петербургский горный университет. Санкт-Петербург, 2017. 250 с.
- Дашко Р.Э., Карпенко А.Г. Современное состояние надземных и подземных конструкций Александровской колонны – интегральная основа ее устойчивости // Записки Горного института. 2023. Т. 263. С. 757–773. EDN: OSYENQ.
- Дашко Р.Э., Горская В.А. Инженерно-геологические и экологические аспекты преобразования моренных грунтов в подземной среде Санкт-Петербурга для оценки их несущей способности // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 12–1 (54). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/inzhenerno-geologicheskie-i-ekologicheskie-aspekty-preobrazovaniya-morenykh-gruntov-v-podzemnoy-srede-sankt-peterburga-dlya-otsenki-ih> (дата обращения: 26.06.2025).
- Александрова О.Ю. Природные и природно-техногенные геологические процессы в подземном пространстве Санкт-Петербурга: закономерности развития, систематизация и возможности предотвращения: специальность 25.00.08 «Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение»: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Санкт-Петербургский горный университет. Санкт-Петербург, 2007. 21 с.
- Глазунов В.В., Бурлуцкий С.Б., Шувалова Р.А., Жданов С.В. Повышение достоверности 3D-моделирования оползневого склона на основе учета данных инженерной геофизики // Записки Горного института. 2022. Т. 257. С. 771–782. DOI: 10.31897/PMI.2022.86.
- СП 420.1325800.2018. Свод правил. Инженерные изыскания для строительства в районах развития оползневых процессов: утвержден Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 21 декабря 2018 г. № 844/пр и введен в действие с 22 июня 2019: введен впервые: дата введения 2019-06-22. М.: Минстрой России, 2018. 60 с.

СТАТЬЯ

УДК 630.181:630\*17:674.032.475.5  
DOI

**ИССЛЕДОВАНИЕ КОРНЕВОЙ СИСТЕМЫ  
ЛЕСНЫХ КУЛЬТУР ЕЛИ ЕВРОПЕЙСКОЙ  
В СЛОЖНЫХ СУБОРЯХ НА ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЕ**

**Прутской А.В.**

*ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет»,  
Брянск, e-mail: prutskoj@yandex.ru*

Выращивание ценных и высокопродуктивных насаждений обеспечивает лесовосстановление. Главной породой является сосна обыкновенная, но в настоящее время она заменяется другими породами, среди которых продолжает оставаться ель европейская. Цель исследования – изучить распределение корневой системы ели европейской в лесных культурах по горизонтам почвы и оценить соотношение надземной и подземной фитомассы в первое десятилетие развития лесных культур. Объектом исследований стали корневые системы семилетних лесных культур ели европейской, произрастающих в сложных субориях. В ходе исследований отмечен замедленный рост в высоту культур ели, особенно созданных посадкой в дно борозд. Для исследований корневой системы ели было отобрано 15 моделей (из характерной части насаждения, отражающей способ и шаг посадки), также были измерены высоты надземных частей ели и взвешена фитомасса надземной и подземной части ели. В ходе исследований установлено, что в первые десятилетия у ели европейской в лесных культурах на подзолистых почвах активно развивается корневая система, которая осваивает гумусовый горизонт почвы, наполняя его активными мелкими (всасывающими) корешками. В первое десятилетие роста еловых насаждений превышение веса надземной части модельных деревьев ели над весом подземной части у большинства моделей составляет 4 и более раз. Это свидетельствует об интенсивном росте надземной части модельных деревьев ели в первое десятилетие.

**Ключевые слова:** корневая система, ель европейская, лесные культуры, почва, исследование

**STUDY OF THE ROOT SYSTEM OF FOREST CROPS  
OF EUROPEAN SPRUCE IN COMPLEX SUBORS ON PODZOLIC SOIL**

**Prutskoy A.V.**

*Bryansk State Engineering-Technological University, Bryansk,  
e-mail: prutskoj@yandex.ru*

Reforestation ensures the cultivation of valuable and highly productive plantations. The main breed is ordinary pine, but at present it is being replaced by other breeds, among which European spruce continues to remain. The purpose of the study is to study the distribution of the European spruce root system in forest crops by soil horizons and to assess the ratio of aboveground and underground phytomass in the first decade of development of forest crops. The object of research was the root systems of seven-year-old forest crops of European spruce growing in complex suboras. In the course of research, there was a slowed growth in the height of spruce crops, especially those created by planting furrows in the bottom. For studies of the spruce root system, 15 models were selected (from the characteristic part of the plantation, reflecting the method and step of planting), the heights of the above-ground parts of the spruce were also measured, and the phytomass of the above-ground and underground parts of the spruce was weighed. In the course of research, it was established that in the first decades, European spruce in forest crops on podzolic soils actively develops the root system, which develops the humus horizon of the soil, filling it with active small (suction) roots. In the first decade of spruce plantation growth, the excess weight of the aboveground part of the model spruce trees over the weight of the underground part, in most models, is 4 or more times. Which indicates the intensive growth of the aboveground part of the model spruce trees in the first decade.

**Keywords:** root system, European spruce, forest crops, soil, research

**Введение**

Одной из проблем лесокультурного производства является выращивание ценных и высокопродуктивных насаждений с использованием передовых достижений селекции и семеноводства хвойных пород [1]. Еловые насаждения неоднократно служили объектом исследований специалистов разных научных направлений [2–4]. При этом до сих пор остаются слабоизученными вопросы устойчивости еловых лесов в ус-

ловиях изменяющегося климата и антропогенной нагрузки [5–7]. Кроме того, из-за поверхностной корневой системы ель подвержена ветровалу и выпадению из насаждения в засушливые сезоны и годы [8]. Поэтому, в связи с возрастающим неблагоприятным влиянием на еловые насаждения ряда факторов, проблема изучения их, получения новой информации в отношении строения и функционирования корневых систем деревьев приобрела особую актуальность [9].

Таблица 1

Таксационная характеристика исследуемых еловых культур  
в условиях сложных суборей ( $C_{2-3}$ ) УОЛ БГИТУ

Состав насаждения	Способ обработки почвы	Способ посадки	Размещение посадочных мест	Возраст, лет	ТЛУ	Вид посадочного материала	Число стволов на 1 га, шт.	Средние		Класс бонитета	Р относительная	М, м <sup>3</sup> /га
								Н, м	Д, см			
10Е ед.Б, Ос	Бороздами ПКЛ-70	Вручную	3,5×0,6	7	$C_2$	$CH_2$	3967	0,8	2,3	II	–	0,4

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

**Цель исследования** – изучить распределение корневой системы ели европейской в лесных культурах по горизонтам почвы и оценить соотношение надземной и подземной фитомассы в первое десятилетие развития лесных культур.

#### Материалы и методы исследования

Объектом исследования стали корневые системы модельных деревьев семи летних лесных культур ели европейской, произрастающие в сложных суборях  $C_{2-3}$  учебно-опытного лесхоза БГИТУ, на супесчаной подзолистой почве, таксационная характеристика которых приведена в табл. 1.

В ходе научных исследований автором была заложена пробная площадь (1 га) по общепринятой методике (ОСТ 56-69-83) [10]. На пробной площади производилась оценка общего состояния лесных культур, отмечалось следующее: развитие деревьев главной породы, имеются ли второстепенные породы, возобновившиеся естественным путем; нет ли угнетения одних пород другими, описывался живой напочвенный покров; проводился сплошной пересчет деревьев. Измерялся диаметр на высоте груди (с точностью до 0,1 см) либо диаметр корневой шейки (если дерево не достигло высоты 1,3 м), высота дерева. Для описания почвенно-грунтовых условий закладывались почвенные разрезы с описанием почвы по общепринятой схеме по горизонтам. Для характеристики живого напочвенного покрова были заложены учетные площадки по определению видового состава травянистой растительности. Размер площадки 1,0×1,0 м.

Исследования корневых систем проводились по методике М.И. Калинина, П.К. Красильникова [11; 12, с. 33], а классификация

корневых систем – по П.К. Красильникову [13]. Раскопка корневых систем начиналась с горизонтальных корней, с постепенным обнажением корней по периферии. Все корни распределялись на группы: горизонтальные поверхностные; горизонтальные глубинные; якорные; стержневые.

В зависимости от толщины корни подразделялись на тонкие ( $d < 2$  мм), полускелетные ( $d = 2,1-4,0$  мм) и скелетные ( $d > 4,0$  мм). Для горизонтальной корневой системы измерялись следующие показатели: длина корня первого и второго порядка; расстояние до ответвлений второго порядка; длина якорных корней и глубина их проникновения; диаметр корней в месте их прикрепления [14].

Статистическая обработка полевого материала производилась на персональном компьютере для выявления исследуемых показателей. Для этой цели использовались штатные пакеты программы «EXE» и программное обеспечение сотрудников университета.

#### Результаты исследования и их обсуждение

В ходе исследования автором отмечен замедленный рост в высоту культур ели, особенно созданных посадкой в дно борозд, и это будет наблюдаться до тех пор, пока корневая система ели не выйдет за пределы борозды шириной 70 см и не достигнет плодородной почвы сдвоенных пластов. Это произойдет примерно через 5–10 лет после посадки культур. Посаженные в дно борозды плуга ПКЛ-70, культуры ели оказываются в условиях недостатка азота, калия, фосфора и временного переувлажнения, что также отмечалось исследованиями А.Р. Родина [15, с. 23].

Таблица 2

Распределение массовой доли корней (в гр. и %) модельных деревьев ели по горизонтам подзолистой почвы

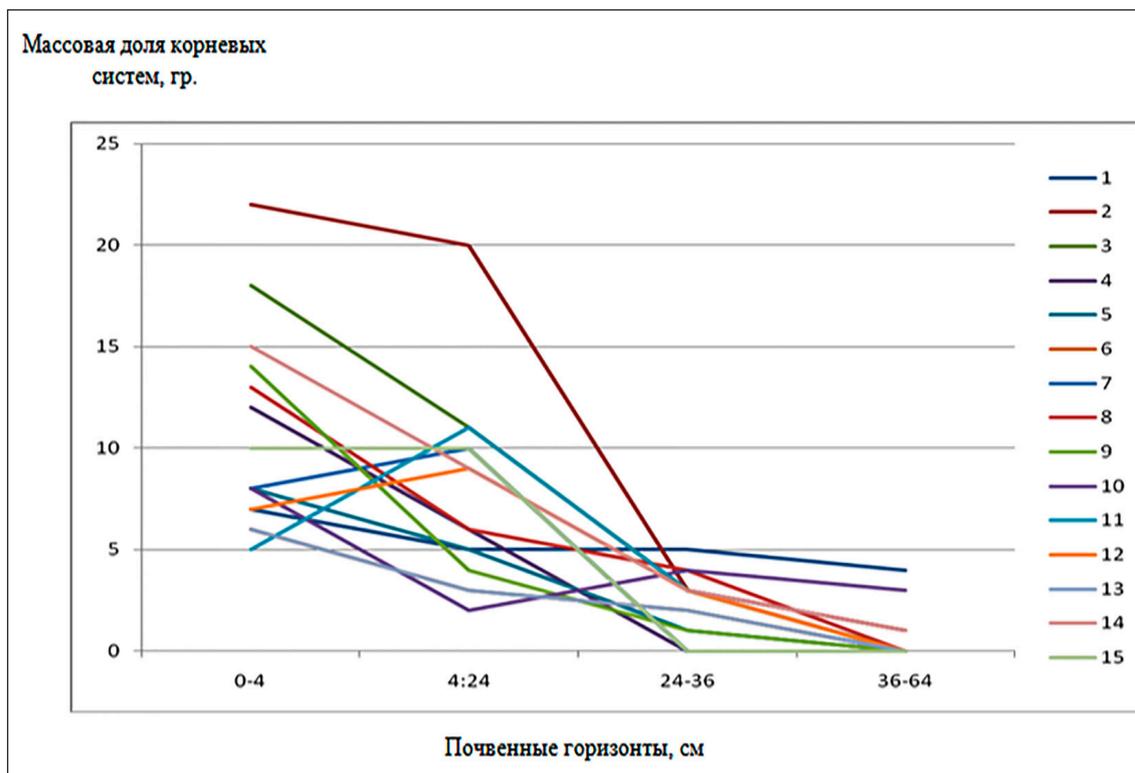
№ модели	Горизонты почвы, см								Всего по горизонтам	
	0–4 (A <sub>0</sub> )	%	4–24 (A <sub>1</sub> )	%	24–36 (A <sub>2</sub> )	%	36–64 (A <sub>2</sub> B)	%	Итого	%
1	7	33,4	5	23,8	5	23,8	4	19,1	21	100
2	22	46,8	20	42,7	3	6,5	1	2,1	47	100
3	18	56,3	11	34,4	3	9,3	0	–	32	100
4	12	66,7	6	33,3	0	–	0	–	18	100
5	8	57,2	5	35,7	1	7,1	0	–	14	100
6	6	54,5	3	27,3	2	18,2	0	–	11	100
7	8	44,4	10	55,6	0	–	0	–	18	100
8	13	56,5	6	26,1	4	17,4	0	–	23	100
9	14	73,4	4	21,3	1	5,3	0	–	19	100
10	8	47,1	2	11,8	4	23,5	3	17,6	17	100
11	5	26,3	11	57,9	3	15,8	0	–	19	100
12	7	36,8	9	47,4	3	15,8	0	–	19	100
13	6	54,5	3	27,3	2	18,2	0	–	11	100
14	15	53,6	9	32,1	3	10,7	1	3,6	28	100
15	10	50,0	10	50,0	0	–	0	–	20	100

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

Для исследований корневой системы ели было отобрано 15 моделей (из характерной части насаждения, отражающей способ и шаг посадки), также были измерены высоты надземных частей ели и взвешена фитомасса надземной и подземной части ели. В результате исследования корневых систем было проанализировано распределение корней по почвенным горизонтам, выявленным в результате почвенных раскопок (табл. 2).

В ходе раскопок корневых систем ели установлена высокая пластичность в распределении тонких корней ( $d < 2$  мм) и полускелетных корней ( $d = 2,1–4,0$  мм), которые в большей степени расположены в горизонте почвы 0–4 см и 4–24 см. Наименьшее количество их отмечено у моделей ели № 13, 12, 11, 6, 1. Наибольшее количество – у моделей ели № 3, 2. Это объясняется различными факторами, среди которых можно выделить своевременность проведения агротехнического ухода, погодные условия, качество посадочного материала и его адаптационные свойства, наличие питательных веществ в гумусовом горизонте и др. Тонкие корни ели, в горизонте почвы 0–4 см, сильно переплетены с дерниной. Полускелетные корни ели в переувлажненных местах гори-

зонта 4–24 и 24–36 см срослись, что дополнительно должно обеспечить устойчивость растущих моделей ели к ветровым нагрузкам. Скелетные корни моделей ели ( $d > 4,0$  мм) сосредоточены в горизонте почвы 24–36 см, особенно это выражено у модели ели № 1, 10. В аллювиальном горизонте почвы, 36–64 см, наибольшее проникновение скелетных корней у моделей ели № 1, 10, что связано с наличием кротовин (до 10% по профилю разреза почвы), где накапливается биогенный материал, привнесенный с расположенных выше горизонтов почвы. По кротовинам скелетные корни ели проникают в более глубокие горизонты почвы, что дополнительно повышает ветроустойчивость моделей ели на данном типе почвы. Такая пластичность корневой системы позволяет ели получать влагу в засушливые периоды времени. Автором исследований установлена усредненная объемная масса почвы для горизонта 4–24 см –  $0,5–1$  г/см<sup>3</sup>, 24–36 см –  $1,1–1,2$  г/см<sup>3</sup>, 36–64 см –  $1,4–1,5$  г/см<sup>3</sup>, а для роста корней ели оптимально  $1,2–1,4$  г/см<sup>3</sup>. На рисунке, для наглядности, приведены графики распределения массовой доли корней по горизонтам почвы соответствующих модельных деревьев.



Распределение массовой доли корней по горизонтам почвы модельных деревьев ели европейской  
 Источник: составлено автором по результатам данного исследования

Таблица 3

Статистический показатель коэффициента корреляции по распределению массовой доли корней и горизонтам почвы исследуемых моделей

№ модели	Коэффициент корреляции, $r$	Основная ошибка определения, $\pm m_r$	Критерий достоверности, $t_r$	Величина преобразованного коэффициента корреляции, $z$	Критерий достоверности преобразованного коэффициента корреляции, $t_z$
1	-0,923	0,271	3,40	-1,611	1,61
2	-0,933	0,255	3,66	-1,680	1,68
3	-0,985	0,121	8,14	-2,451	2,45
4	-0,944	0,234	4,04	-1,772	1,77
5	-0,978	0,148	6,60	-2,245	2,24
6	-0,981	0,137	7,18	-2,328	2,33
7	-0,834	0,390	2,14	-1,203	1,20
8	-0,973	0,163	5,98	-2,149	2,15
9	-0,908	0,296	3,07	-1,517	1,52
10	-0,638	0,544	1,17	-0,755	0,76
11	-0,639	0,544	1,18	-0,757	0,76
12	-0,865	0,355	2,43	-1,312	1,31
13	-0,981	0,137	7,18	-2,328	2,33
14	-0,980	0,141	6,93	-2,292	2,29
15	-0,894	0,316	2,83	-1,444	1,44

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

Таблица 4

Основные показатели фитомассы исследуемых моделей

№ модели	Вес надземной части, кг	Вес подземной части, кг	Превышение веса надземной части над весом подземной части	Диаметр в месте прикрепления надземной части, см	Высота надземной части, см	Длина основных развитых скелетных корней, см
1	0,610	0,150	4,1	2	81	46; 34; 52
2	1,610	0,290	5,6	4	98	71; 77; 50; 41
3	0,710	0,190	3,7	2	80	97; 53; 30; 84
4	0,450	0,100	4,5	2	82	60; 30
5	0,490	0,110	4,5	1,7	80	74; 42
6	0,420	0,150	2,8	3	100	87; 61
7	0,500	0,100	5,0	2,2	83	89; 46; 38
8	0,310	0,090	3,4	1,7	60	50; 47
9	0,310	0,120	2,6	2,5	67	108; 52; 20
10	0,310	0,090	3,4	2,2	65	62; 52; 45
11	0,320	0,080	4,0	2,5	73	55; 20; 25; 33
12	0,390	0,060	6,5	1,5	69	49; 57
13	0,500	0,090	5,6	2	79	70; 81; 30
14	0,340	0,050	6,8	1,7	65	68; 31
15	0,310	0,100	3,1	2	63	43; 30; 30

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

Анализируя данный рисунок, можно сделать вывод, что основная масса корней исследуемых моделей располагается в гумусовом горизонте, что объясняется его наибольшим плодородием, а также соответствует биологическим особенностям ели европейской, имеющей поверхностную корневую систему.

Статистический показатель коэффициента корреляции по распределению массовой доли корней и горизонтам почвы исследуемых моделей представлен в табл. 3.

Согласно статистической обработке величина коэффициента корреляции приближается к единице, что свидетельствует о наличии высокой зависимости массовой доли корней от почвенного горизонта и подтверждает сделанные нами исследования.

Основные показатели исследуемых моделей по фитомассе показаны в табл. 4.

Согласно данным табл. 4 превышение веса надземной части модельных деревьев над весом подземной части, у большинства моделей составляет 4 и более раз. Высота надземной части моделей ели превышает длину основных развитых скелетных корней в 1,1–1,3 раза. Это свидетельствует об интенсивном росте надземной части модельных деревьев ели в первое десятилетие.

### Заключение

В ходе проведенного исследования установлено, что в первое десятилетие у ели европейской в лесных культурах, на подзолистых почвах УОЛ БГИТУ, активно развивается корневая система, которая осваивает гумусовый горизонт почвы, наполняя его активными мелкими (всасывающими) корешками.

Превышение веса надземной части деревьев ели над весом подземной части у большинства моделей составляет 4 и более раз. Это свидетельствует об интенсивном росте надземной части модельных деревьев ели в первое десятилетие.

### Список литературы

1. Раевский Б.В., Игнатенко Р.В., Новичонок Е.В., Прокопюк В.М., Куклина К.К. Современное состояние селекции и семеноводства хвойных пород // Известия вузов. Лесной журнал. 2022. № 6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennoe-sostoyanie-selektcii-i-semenovodstva-hvoynyh-porod> (дата обращения: 11.06.2025). DOI: 10.37482/0536-1036-2022-6-9-37.

2. Белова А.И., Хамитов Р.С., Хамитова С.М., Полякова Е.С. Рост лесных культур ели европейской, созданных сеянцами с закрытой корневой системой // Хвойные бореальной зоны. 2022. № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rost-lesnyh-kultur-eli-evropeyskoj-sozdannyh-seyantsami-s-zakrytoy-kornevoy-sistemoy> (дата обращения: 11.06.2025). DOI: 10.53374/1993-0135-2022-2-109-113.

3. Мерзленко М.Д., Мельник П.Г., Тишков А.С. Ель европейская как лесобразователь на Смоленско-Московской возвышенности // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. 2024. № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/el-evropeyskaya-kak-lesoobrazovatel-na-smolensko-moskovskoy-vozvyshennosti> (дата обращения: 11.06.2025). DOI: 10.18698/2542-1468-2024-1-5-13.
4. Пеккоев А.Н., Неронова Я.А. Влияние вида посадочного материала и способов обработки почвы на сохранность, рост и структуру древесины 24-летних культур ели // Известия СПбЛТА. 2024. № 247. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyaniye-vida-posadochnogo-materiala-i-sposobov-obrabotki-pochvy-na-sohrannost-rost-i-strukturu-drevesiny-24letnih-kultur-eli> (дата обращения: 11.06.2025). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.247.42-55.
5. Агафонова Т.Н., Залесов С.В., Итешина Н.М., Семёнова М. Санитарное состояние еловых древостоев по густоте и запасу // Международный научно-исследовательский журнал. 2025. № 3 (153). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sanitarnoe-sostoyaniye-elovyh-drevostoev-po-gustote-i-zapasu> (дата обращения: 11.06.2025). DOI: 10.60797/IRJ.2025.153.67.
6. Белова А.И., Лебедев Е.В., Хамитов Р.С. Влияние метеорологических условий на рост культур ели с закрытой корневой системой // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. 2023. № 5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyaniye-meteorologicheskikh-usloviy-na-rost-kultur-eli-s-zakrytoy-kornevoy-sistemoy> (дата обращения: 11.06.2025). DOI: 10.18698/2542-1468-2023-5-100-108.
7. Фрейберг И.А., Залесов С.В., Терин А.А. Совершенствование технологии восстановления хвойных насаждений // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 5. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=10263> (дата обращения: 11.06.2025).
8. Ананьев В.А., Пеккоев А.Н., Грабовик С.И., Мошников С.А., Медведева М.В., Руоколайнен А.В., Колесникова В.М., Грабелкис В.В. Динамика биоразнообразия на сплошном ветровале в коренных среднетаежных ельниках национального парка «Водлозерский» (Россия) // Nature Conservation Research. Заповедная наука. 2023. № 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/dinamika-bioraznoobraziya-na-sploshnom-ventrovale-v-korenykh-srednetaezhnykh-elnikah-natsionalnogo-parka-vodlozerskiy-rossiya> (дата обращения: 11.06.2025). DOI: 10.24189/nrc.2023.024.
9. Рязанцев П.А., Кабонен А.В. Критерии картирования и оценки корневых систем методом георадиолокации на примере ели европейской // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. 2024. № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kriterii-kartirovaniya-i-otsenki-kornevykh-sistem-metodom-georadiolokatsii-na-primere-eli-evropeyskoy> (дата обращения: 11.06.2025). DOI: 10.21638/spbu07.2024.203.
10. ОСТ 56-69-83. Пробные площади лесоустроительные. Метод закладки. М.: ЦБНТИлесхоз, 1984. 18 с.
11. Калинин М.И. Формирование корневой системы деревьев. М.: Лесная промышленность, 1983. 152 с.
12. Красильников П.К. Методика полевого изучения подземных частей растений: (С учетом специфики ресурсовед. исслед.). Л.: Наука: Ленингр. отделение, 1983. 207 с. ISBN В пер. (В пер.).
13. Красильников П.К. Классификация корневых систем деревьев и кустарников // Лесоведение. 1970. № 3. С. 35–45. DOI: 10.1007/lesovedenie.1970.3.35-44.
14. Рожков В.А., Кузнецова И.В., Рахматуллоев Х.Р. Методы изучения корневых систем растений в поле и лаборатории. 2-е изд. М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2008. 51 с.
15. Родин С.А. Эколого-ресурсосберегающие технологии лесовосстановления и моделирование выращивания культур ели на вырубках зоны хвойно-широколиственных лесов: автореф. дис. ... докт. сельхоз. наук. Воронеж, 2004. 46 с.