ISSN: 2686-7877 (print)
ISSN: 2686-8385 (online)

ГИДРОСФЕРА
ОПАСНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ

HYDROSPHERE
HAZARD PROCESSES AND PHENOMENA

www.hydro-sphere.ru



2026 Том 8 Выпуск 2



ГИДРОСФЕРА. ОПАСНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ

Том 8, Выпуск 2

Выходит 4 раза в год

ISSN 2686-7877 (print)

ISSN 2686-8385 (online)

Учредитель журнала

Научно-производственное объединение «Гидротехпроект» (г. Санкт-Петербург, Россия)

Главный редактор

академик РАН **Г.И. Долгих**, Дальневосточное отделение Российской академии наук, заместитель председателя президиума (г. Владивосток, Россия)

Заместители главного редактора

докт. техн. наук, доц. **А.Ю. Виноградов**, Научно-производственное объединение «Гидротехпроект», генеральный директор (г. Санкт-Петербург, Россия)

член-корреспондент РАН **А.Н. Гельфан**, Институт водных проблем Российской академии наук, заведующий отделом гидрологии речных бассейнов (г. Москва, Россия)

докт. геогр. наук, с.н.с. **Д.А. Субетто**, Российский государственный педагогический университет имени А.И. Герцена, декан факультета географии (г. Санкт-Петербург, Россия)

канд. геогр. наук **В.О. Полянин**, Институт водных проблем Российской академии наук, директор (г. Москва, Россия)

Ответственный секретарь

докт. геогр. наук, доц. **В.А. Обязов**, Научно-производственное объединение «Гидротехпроект», технический директор (г. Санкт-Петербург, Россия), тел.: +7(812)313-83-48, e-mail:os@hydro-sphere.ru

HYDROSPHERE. HAZARD PROCESSES AND PHENOMENA

Volume 8, Issue 2

Issued 4 times per year

ISSN 2686-7877 (print)

ISSN 2686-8385 (online)

Founder

Scientific Production Association «Gidrotechproekt» (Saint-Petersburg, Russia)

Editor-In-Chief

Grigoriy I. Dolgikh, Academician of the Russian Academy of Sciences, Deputy Chairman of Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences (Vladivostok, Russia)

Deputy Editor-In-Chief

Alexander N. Gelfan, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Head of the Department of River Basin Hydrology of the Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)

Vladislav O. Polyanin, Ph.D. in Geography, Director of the Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)

Dmitriy A. Subetto, Doctor of Science, Dean of the Faculty of Geography of the Herzen State Pedagogical University of Russia (Saint-Petersburg, Russia)

Alexey Yu. Vinogradov, Doctor of Science, Director of the Scientific Production Association «Gidrotechproekt» (Saint-Petersburg, Russia)

Executive Editor

Victor A. Obyazov, Doctor of Science, Technical director of the Scientific Production Association «Gidrotechproekt» (Saint-Petersburg, Russia), tel. +7(812)313-83-48, e-mail: os@hydro-sphere.ru

Редакционный совет

академик РАН **Г.И. Долгих**, Дальневосточное отделение Российской академии наук, заместитель председателя президиума (г. Владивосток, Россия)
докт. техн. наук, доц. **А.Ю. Виноградов**, Научно-производственное объединение «Гидротехпроект», генеральный директор (г. Санкт-Петербург, Россия)
докт. геогр. наук **Б.И. Гарцман**, Институт водных проблем Российской академии наук, руководитель Южного филиала, главный научный сотрудник (г. Севастополь, Россия)
член-корреспондент РАН **А.Н. Гельфан**, Институт водных проблем Российской академии наук, главный научный сотрудник, заведующий отделом гидрологии речных бассейнов (г. Москва, Россия)
канд. геогр. наук **В.О. Полянин**, Институт водных проблем Российской академии наук, директор (г. Москва, Россия)
докт. геогр. наук, с.н.с. **Д.А. Субетто**, Российский государственный педагогический университет имени А.И. Герцена, декан факультета географии (г. Санкт-Петербург, Россия)
докт. геогр. наук, доц. **В.А. Обязов**, Научно-производственное объединение «Гидротехпроект», технический директор (г. Санкт-Петербург, Россия)

Editorial Council

Grigoriy I. Dolgikh, Academician of the Russian Academy of Sciences, Deputy Chairman of Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences (Vladivostok, Russia)
Boris I. Gartsman, Doctor of Science, Head of Southern Branch of the Institute of Water Problems, Russian Academy of Sciences (Sevastopol, Russia)
Alexander N. Gelfan, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Head of the Department of River Basin Hydrology of the Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)
Vladislav O. Polyanin, Ph.D. in Geography, Director of the Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)
Dmitriy A. Subetto, Doctor of Science, Dean of the Faculty of Geography of the Herzen State Pedagogical University (Saint-Petersburg, Russia)
Alexey Yu. Vinogradov, Doctor of Science, Director of the Scientific Production Association «Gidrotechproekt» (Saint-Petersburg, Russia)
Victor A. Obyazov, Doctor of Science, Technical Director of the Scientific Production Association «Gidrotechproekt» (Saint-Petersburg, Russia)

Редакционная коллегия

докт. биол. наук **В.Н. Безносов**, Научно-производственное объединение «Гидротехпроект», главный научный сотрудник (г. Санкт-Петербург, Россия)
докт. геогр. наук **В.П. Благовещенский**, Институт географии Республики Казахстан, заведующий лабораторией природных опасностей (г. Алматы, Казахстан)
докт. физ.-мат. наук **Ф.Ф. Брюхань**, Научно-производственное объединение «Гидротехпроект», главный научный сотрудник (г. Санкт-Петербург, Россия)
проф. **Ф. Вэй**, Институт зеленых и интеллектуальных технологий Китайской академии наук, заместитель директора (г. Чунцин, КНР)
академик РАН **Е.Ж. Гармаев**, Байкальский институт природопользования Сибирского отделения Российской академии наук, директор (г. Улан-Удэ,Россия)

Editorial Board

Victor N. Beznosov, Doctor of Science, Principal Researcher of the Scientific Production Association «Gidrotechproekt» (Saint-Petersburg, Russia)
Victor P. Blagovechshenskiy, Doctor of Science, Head of the Laboratory of Natural Hazards, Institute of Geography of the Republic of Kazakhstan (Almaty, Kazakhstan)
Fedor F. Bryukhan, Doctor of Science, Principal Researcher of the Scientific Production Association «Gidrotechproekt» (Saint-Petersburg, Russia)
Sergey S. Chernomorets, Associate Professor, Senior Researcher of the Laboratory of Snow Avalanches and Debris Flows of the Lomonosov Moscow State University, and President of the Debris Flow Association (Moscow, Russia)
Pavel A. Chernous, Ph.D., Leading Researcher of the Laboratory of Exogenous Geodynamic Processes and Snow Cover of the Special Design Bureau for Marine Research Automation Tools of

докт. физ.-мат. наук **В.К. Гусяков**, Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук, заведующий лабораторией математиче-ского моделирования волн цунами (г. Новосибирск, Россия)
докт. **В. Джомелли**, Институт экологии и окружающей среды Национального центра научных исследований Франции, Университета Пантеон-Сорбонна и Университета Париж-Восток Кретей, директор по исследованиям (г. Париж, Франция)
проф. **К. де Йонг**, Страсбургский университет, заведующая кафедрой международных отношений факультета географии и регионального планирования (г. Страсбург, Франция)
член-корреспондент РАН **А.И. Зайцев**, Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований Дальневосточного отделения Российской академии наук, директор (г. Южно-Сахалинск, Россия)
докт. геогр. наук, проф. **Н.А. Калинин**, Пермский государственный национальный исследовательский университет, заведующий кафедрой метеорологии и охраны атмосферы (г. Пермь, Россия)
докт. геол.-мин. наук, доц. **А.А. Лаврусевич**, Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе, заведующий кафедрой урбоэкологии (г. Москва, Россия)
академик НАН Белоруси, иностранный член РАН **В.Ф. Логинов**, Институт природопользования НАН Беларуси, главный научный сотрудник (г. Минск, Беларусь)
канд. геогр. наук, доц. **М.Л. Марков**, Государственный гидрологический институт, заведующий отделом гидрологических процессов (г. Санкт-Петербург, Россия)
академик НАН РК **А.Р. Медеу**, Институт географии и водной безопасности Республики Казахстан, председатель правления (г. Алматы, Казахстан)
докт. геогр. наук **Р.Я. Миньковская**, Морской гидрофизический институт РАН, старший научный сотрудник отдела гидрофизики шельфа (г. Севастополь, Россия)
проф. **К. Нишимура**, Японская ассоциации снега и льда, президент (г. Токио, Япония)

the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (Yuzhno-Sakhalinsk, Russia)
Sven Fuchs, Doctor of Sciences, Deputy of Head of the Institute of Mountain Risk Engineering of the BOKU University (Vienna, Austria)
Endon Zh. Garmaev, Academician of the Russian Academy of Sciences, Director of the Baikal Institute of Nature Management Siberian branch of the Russian Academy of sciences (Ulan-Ude, Russia)
Viacheslav K. Gusiakov, Doctor of Science, The Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Chief Researcher (Novosibirsk, Russia)
Vincent Jomelli, Ph.D., Research Director of the Institute of Ecology and Environment of the French National Center for Scientific Research, the University Panthéon-Sorbonne and the University Paris-Est Créteil (Paris, France)
Carmen de Jong, Professor, Head of International Relations at the Faculty of Geography and Regional Planning, University of Strasbourg (Strasbourg, France)
Nicolay A. Kalinin, Professor, Head of the Department of Meteorology and Atmosphere Protection of the Perm State University (Perm, Russia)
Andrey A. Lavrusevich, Doctor of Science, Head of the Department of Urboecology of the Sergo Ordzhonikidze Russian State University of Geological Prospecting (Moscow, Russia)
Vladimir F. Loginov, Foreign member of the Russian Academy of Sciences, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Chief Researcher of Institute for Environmental Management (Minsk, Belarus)
Mikhail L. Markov, Associate Professor, Head of the Department of Hydrological Processes of the State Hydrological Institute (Saint-Petersburg, Russia)
Akhmetkal R. Medeu, Academician of the National Academy of Sciences of Kazakhstan, Chairman of the Board of the Institute of Geography and Water Security of Kazakhstan (Almaty, Kazakhstan)
Rosa Ya. Minkovskaya, Doctor of Science, Senior Researcher of the Shelf Hydrophysics Department of the Marine Hydrophysical Institute of the Russian Academy of Sciences (Sevastopol, Russia)

член-корреспондент РАН **А.В. Панин**, Институт географии Российской академии наук, заместитель директора по научной работе (г. Москва, Россия)
академик НАН РК **И.В. Северский**, Центрально-Азиатский региональный гляциологический центр, научный руководитель (г. Алматы, Казахстан)
канд. геогр. наук, доцент **С.А. Сократов,** Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, заместитель декана географического факультета по научной работе (г. Москва, Россия)
докт. геогр. наук, проф. **Е.А. Таланов,** Казахский национальный университет имени Аль-Фараби, профессор кафедры метеорологии и гидрологии (г. Алматы, Казахстан)
академик РАН **А.К. Тулохонов,** Байкальский институт природопользования Сибирского отделения Российской академии наук, научный руководитель (г. Улан-Удэ, Россия)
докт. геол-мин. наук **В.Е. Тумской**, Институт мерзлотоведения имени П.И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук, главный научный сотрудник лаборатории общей геокриологии (г. Якутск, Россия)
докт. техн. наук, проф. **С.А. Угрюмов**, Санкт-Петербургский лесотехнический университет им. С.М. Кирова, заведующий кафедрой (г. Санкт-Петербург, Россия)
докт. **С. Фукс**, Институт горных рисков Университета природных ресурсов и наук о жизни, заместитель директора (г. Вена, Австрия)
канд. геогр. наук, доц. **С.С**. **Черноморец**, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, старший научный сотрудник лаборатории снежных лавин и селей географического факультета, президент Селевой ассоциации (г. Москва, Россия)
канд. геогр. наук **П.А. Черноус**, Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований Дальневосточного отделения Российской академии наук, ведущий научный сотрудник лаборатории экзогенных геодинамических процессов и снежного покрова (г. Южно-Сахалинск, Россия)
канд. тех. наук **С.В. Шварёв**, Институт географии Российской академии наук, заведующий лабораторией геоморфологии (г. Москва, Россия)

Kouichi Nishimura, Professor, President of Japanese Society of Snow and Ice (Tokyo, Japan)
Andrey V. Panin, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Scientific Director of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)
Igor V. Severskiy, Academician of the National Academy of Sciences of Kazakhstan, Scientific leader of Central Asian Regional Glaciological Centre (Almaty, Kazakhstan)
Sergey V. Shvarev, Ph.D., Head of the Laboratory of Geomorphology of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)
Sergey A. Sokratov, Ph.D. in Environmental & Earth Sci., Associate Professor, Deputy Dean for Research of the Faculty of Geography of Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia)
Yevgeniy A. Talanov, Doctor of Science, Professor, Professor of the Meteorology and Hydrology Department Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan)
Arnold K. Tulokhonov, Academician of the Russian Academy of Sciences, Scientific Director of the Baikal Institute of Nature Management Siberian branch of the Russian Academy of Sciences (Ulan-Ude, Russia)
Vladimir E. Tumskoy, Doctor of Science, Chief Researcher of the Laboratory of General Geocryology of the Melnikov Permafrost Institute Siberian branch of the Russian Academy of Sciences (Yakutsk, Russia)
Sergey A. Ugryumov, Professor, Doctor of Science Head of department at St. Petersburg Forestry University named after. C.M. Kirov (St. Petersburg, Russia)
Fangqiang Wei, Professor, Vice-Director of the Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences (Chongqing, China)
Kouichi Nishimura, Professor, President of Japanese Society of Snow and Ice (Tokyo, Japan)
Satoru Yamaguchi, Ph.D., Chief Researcher of the Snow and Ice Research Division of the National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (Nagaoka, Japan)
Andrey I. Zaitsev, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Director of Special Research Bureau for Automation of Marine Researches, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (Yuzhno-Sakhalinsk, Russia)

докт. **С. Ямагучи**, Научно-исследовательский центр снега и льда Национального исследовательского института наук о Земле и устойчивости к стихийным бедствиям, старший научный сотрудник (г. Нагаока, Япония)

Технический редактор

Информацию о принятых в печать материалах можно получить на сайте журнала или у технического редактора, e-mail info@hydro-sphere.ru.
Сведения о вышедших номерах и условиях подписки на сайте журнала: www.hydro-sphere.ru.
Свидетельство о регистрации СМИ **ПИ № ФС 77-76914** от 11.10.2019.

Издание включено в **«Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук»** по специальностям (отраслям):
1.6.7. Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение (Геолого-минералогические)
1.6.8. Гляциология и криология Земли (Географические)
1.6.12. Физическая география и биогеография, география почв и геохимия ландшафтов (Географические)
1.6.14. Геоморфология и палеогеография (Географические)
1.6.16. Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия (Географические)
1.6.17. Океанология (Физико-математические)
1.6.18. Науки об атмосфере и климате (Географические)
1.6.21. Геоэкология (Географические)
2.1.6. Гидротехническое строительство, гидравлика и инженерная гидрология (Технические)
4.3.4. Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины (Технические)

ИЗДАТЕЛЬСТВО:
ООО НПО «Гидротехпроект»
АДРЕС РЕДАКЦИИ:
г. Санкт-Петербург, ул. Кораблестроителей, д. 34, лит. А, пом. 21-Н
Для почтовых отправлений:
199397 Санкт-Петербург, ул. Кораблестроителей, д. 34, лит. А, пом. 21-Н.
«Гидросфера. Опасные процессы и явления»
Тел. +7(812)313-83-48, e-mail: info@hydro-sphere.ru

Technical editor

Information on materials accepted for publication can be obtained on the journal's website or by e-mail info@hydro-sphere.ru to technical editor.

Information about the issues and subscription conditions on the journal website: www.hydro-sphere.ru.
Certificate of registration as the media **ПИ No ФС 77-76914** from 11.10.2019.

PUBLISHING:
Scientific Production Association «Gidrotechproekt»
EDITORIAL ADDRESS:
Russia, Saint-Petersburg, Korablestoitelej str., 34, lit.A, 21-H.
For corresponding:
199397, Korablestoitelej str., 34, lit.A, 21-H,
St. Petersburg. Editorial Board of the «Hydrosphere. Hazardous processes and phenomena»
Tel. +7(812)313-83-48, e-mail: info@hydro-sphere.ru

СОДЕРЖАНИЕ

МОНИТОРИНГОВЫЕ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ЭКСПЕДИЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ 128

Влияние засухи на состояние морского устья р. Чёрной (Севастопольский регион) Р. Я. Миньковская, А. Н. Демидов 128

ГЛОБАЛЬНЫЕ И РЕГИОНАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИРОДЫ И КЛИМАТА 144

Вариация изотопного состава современных атмосферных осадков на северном побережье Черного моря (Карадагский заповедник, Крым) С. В. Токарев, В. А. Лапченко, Ю. В. Дублянский 144

ОПАСНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ГИДРОСФЕРЕ: ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ИНЖЕНЕРНЫЕ АСПЕКТЫ 163

Оценка интенсивности града на основе регрессионного анализа и нейросетевого моделирования А. Х. Кагермазов, Л. Т. Созаева 163

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ И ОПАСНОСТИ В ГИДРОСФЕРЕ 171

Геоэкологическая оценка территорий Орловского и Новоорловского ГОКов на основе данных о термических аномалиях Д. В. Кочев, Л. В. Шумилова, К. В. Свалова, К. В. Насоловец 171

МЕТОДЫ, МОДЕЛИ И ТЕХНОЛОГИИ 187

Уникальный и малоизвестный подвид техногенного псевдокарста А. А. Лаврусевич, С. В. Шендяпина, И. А. Лаврусевич, О. Е. Вязкова, Л. Н. Трофимец, А. И. Абенэ, А. Ю. Виноградов 187

Роль инженерно-геологических условий в формировании и сохранении исторической природно-технической системы крепости Ям О. Е. Вязкова, Ю. П. Стародубова, П. А. Игнатов, И. А. Лаврусевич, А. И. Абенэ, В. А. Обязов 198

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ 210

CONTENTS

MONITORING, EXPERIMENTAL AND EXPEDITIONARY RESEARCH 128

The Influence of Drought on the State of the Sea Mouth of the Chernaya River (Sevastopol Region) Roza Ya. Minkovskaya, Alexander N. Demidov 128

GLOBAL AND REGIONAL CHANGES OF NATURE AND CLIMATE 144

Variation in the Isotopic Composition of Modern Atmospheric Precipitation on the Northern Coast of the Black Sea (Karadag Nature Reserve, Crimea) Sergey V. Tokarev, Vladimir A. Lapchenko, Yuri V. Dublyansky 144

HAZARDOUS PROCESSES IN THE HYDROSPHERE: FUNDAMENTAL AND ENGINEERING ASPECTS 163

Estimation of Hail Intensity Based on Regression Analysis and Neural Network Modeling Artur Kh. Kagermazov, Lezhinka T. Sozaeva 163

ECOLOGICAL PROBLEMS AND HAZARDS IN THE HYDROSPHERE 171

Geoecological Assessment of the Territories of the Orlovsky and Novoorlovsky Mining and Processing Plants Based on Data on Thermal Anomalies Denis V. Kochev, Lidiya V. Shumilova, Kristina V. Svalova, Konstantin V. Nasolovets 171

METHODS, MODELS AND TECHNOLOGIES 187

A Unique and Obscure Subtype of Technogenic Pseudokarst Andrey A. Lavrusevich, Svetlana V. Shendyapina, Ivan A. Lavrusevich, Olga E. Vyazkova, Lyubov N. Trofimetz, Alisa I. Abene, Alexey Yu. Vinogradov 187

The Role of Engineering-Geological Conditions in the Formation and Preservation of the Historical Natural-Technical System of the Yam Fortress Olga E. Vyazkova, Yulia P. Starodubova, Pyotr A. Ignatov, Ivan A. Lavrusevich, Alisa I. Abene, Victor A. Obyazov .. 198

AUTHORS GUIDELINE 210

МОНИТОРИНГОВЫЕ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ЭКСПЕДИЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
MONITORING, EXPERIMENTAL AND EXPEDITIONARY RESEARCH

Научная статья / Scientific paper

УДК 556.044+556.54+556.166+556.332.72

DOI: 10.34753/HS.2026.8.2.128

Влияние засухи на состояние морского устья р. Чёрной (Севастопольский регион)

Р. Я. Миньковская[1], А. Н. Демидов[2]

[1]*Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь, Россия;*

[2]*Севастопольское отделение Государственного океанографического института имени Н.Н. Зубова, г. Севастополь, Россия*

e-mail: rosmink@yandex.ru

Аннотация. В условиях аридного климата Севастопольского региона, особенностей паводочного режима стока р. Чёрной и её притоков, регулирования стока Чернореченским водохранилищем, наиболее неблагоприятные периоды для населения связаны с экологическими рисками, обусловленными засухой. Она приводит не только к дефициту водных ресурсов и проблемам водоснабжения, но и существенно снижает рекреационный потенциал. Исследование влияния низкой межени на состояние морского устья р. Чёрной выполнено на основе натурных данных, полученных в ходе экспедиций отдела гидрофизики шельфа Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Морской гидрофизический институт РАН» и Севастопольского отделения Федерального государственного бюджетного учреждения «Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова» в 1991–2025 гг., а также стационарных наблюдений на гидропостах и метеостанциях Росгидромета. Основным критерием изменения качества водной среды выбрана солёность поверхностного слоя воды, подверженная существенной изменчивости под влиянием речного стока, сточных вод г. Севастополя, испарения и других факторов. Впервые проанализированы аномальные случаи (составляющие около 20 % океанографических съёмок) осолонения устьевого взморья и устьевого участка р. Чёрной при различном стоке межени и маловетрии. В засушливое лето 2025 г. реки, питающие Чернореченское водохранилище, и притоки р. Чёрной пересохли, что вызвало экстремальное (до 20 ‰), зафиксированное впервые, осолонение поверхностного слоя воды Севастопольской бухты и устьевого участка реки.

Ключевые слова: устье р. Чёрной; засуха; опасные явления; осолонение Севастопольской бухты; изменчивость солёности воды; влияние речного стока на устьевое взморье.

Для цитирования: Миньковская Р. Я., Демидов А. Н. Влияние засухи на состояние морского устья р. Чёрной (Севастопольский регион) // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2026. Т. 8. Вып. 2. С. 128–143. DOI: 10.34753/HS.2026.8.2.128.

The Influence of Drought on the State of the Sea Mouth of the Chernaya River (Sevastopol Region)

Roza Ya. Minkovskaya[1], Alexander N. Demidov[2]

[1]*Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia;*

[2]*Sevastopol Branch of the N.N. Zubov State Oceanographic Institute, Sevastopol, Russia*

e-mail: rosmink@yandex.ru

Abstract. In the conditions of the arid climate of the Sevastopol region, the peculiarities of the flood flow of the Chernaya River and its regulation by the Chernorechensk Reservoir, the most unfavorable periods for the population are associated with environmental risks caused by drought. The study of the effect of low-flow period on the state of the sea mouth of the Chernaya River was carried out on the basis of field data obtained during expeditions of the

Department of Shelf Hydrophysics of Federal State Budgetary Institution of Science Federal Research Center «Marine Hydrophysical Institute of the Russian Academy of Sciences», and Sevastopol branch of the Federal State Budgetary Institution «N.N. Zubov State Oceanographic Institute» in 1991–2025, as well as stationary observations at hydrological gauging stations and weather stations of the Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring. The main criterion for changes in the quality of the aquatic environment is the salinity of the surface water layer, which is subject to significant variability under the influence of river runoff, wastewater from Sevastopol, evaporation and other factors. For the first time, anomalous cases of salinization of the estuarine coastal area and the estuarine section of the Chernaya River (about 20 % of oceanographic surveys) were analyzed under different outflow conditions with low wind speeds and reduced runoff. In the dry summer of 2025 the rivers flowing into the Chernorechensk Reservoir, and the tributaries of the Chernaya River dried up, which caused extreme (up to 20 ‰) salinization of the Sevastopol Bay and the estuary section of the river, which was recorded for the first time.

Keywords: mouth of the Chernaya River; drought; dangerous phenomena; salination of Sevastopol Bay; variability of water salinity; influence of river runoff on the estuarine coast.

For citation: Minkovskaya R. Ya., Demidov A. N. The Influence of Drought on the State of the Sea Mouth of the Chernaya River (Sevastopol Region). Hydrosphere. Hazard processes and phenomena, 2026, vol. 8, iss. 2, pp. 128–143. DOI: 10.34753/HS.2026.8.2.128. (In Russian; abstract in English).

Введение

На устьевых взморьях рек, в зоне смешения разнородных вод, в диапазоне солёности 2–8 ‰ за счет физических, химических и биохимических процессов происходит уменьшение (на 30–60 %) концентрации минеральных и органических веществ в воде и их депонирование в донных отложениях [1]. Это характерно для межени, когда транспортирующая способность потока уменьшается, а риск заиления устьевых участков рек и прилегающей к ним акватории увеличивается. Климатическая фронтальная зона в устьях рек обычно приурочена к солёности 8–10 ‰ и формируется при маловетрии в период нагрева, при прямой температурной стратификации [2].

Река Чёрная, включая её устьевое взморье, расположена в Севастопольском регионе, её вода аккумулируется в Чернореченском водохранилище, компенсационного типа, и используется для водообеспечения г. Севастополя. К устьевой области реки относятся (рисунок 1): 1 – её устьевой участок (0,6 км); 2 – искусственно созданные на месте плавней, дельты и болота водные объекты (ковш порта г. Инкермана и канал «Река Чёрная», с характерным для черноморских лиманов режимом, условно называемые «Инкерманским лиманом»); 3, 4 – Севастопольская бухта (6,4 км) и прилегающая к ней северо-западная часть Чёрного моря, распресняющиеся в период сильных паводков [3, 4]. Однако в современный климатический период (1991–2025 гг.), в среднем, влияние стока р. Чёрной распространяется в пределах района 3, где и проходит средняя многолетняя морская граница устья. Таким образом, объект исследования ограничен районами 1–4 (см. рисунок 1).

При средних гидрометеорологических условиях, гидрофронтальная зона в устье р. Чёрной локализуется [2] в районе 2 (см. рисунок 1). Для этого района характерна аккумуляция взвешенных органических веществ на верхней границе слоя скачка плотности, увеличение концентрации всех видов гидробионтов, активизация биологических процессов, нарушение вертикального газового обмена. Иногда это приводит к локальному «цветению» фитопланктона в поверхностном слое воды [1], что ухудшает экологические условия Севастопольского региона.

Перемещение зоны взаимодействия речной и морской воды вглубь материка, происходящее из-за трансгрессии моря и потепления климата [5], может привести к устойчивому осолонению ранее пресноводных акваторий, смене биоценозов [6], аккумуляции на устьевом участке реки биогенных веществ, транспортируемых рекой с её бассейна и сбрасываемых со сточными водами, а также нефтяных углеводородов и других загрязняющих веществ, поступающих из Севастопольской бухты [2]. Процессы эвтрофирования воды, характерные для шельфа

северо-западной части Чёрного моря [7], в устье р. Чёрной стали отмечаться регулярно (рисунок 2) из-за аккумуляции поводков в чаше Чернореченского водохранилища, ранее способствовавших «промывке» устьевого участка реки, уменьшения стока воды в период низкой межени, сооружения дорожного перекрытия (дамбы) в вершине устья, что нарушило водообмен между рекой и взморьем [8], а также увеличения индекса трофности [9].

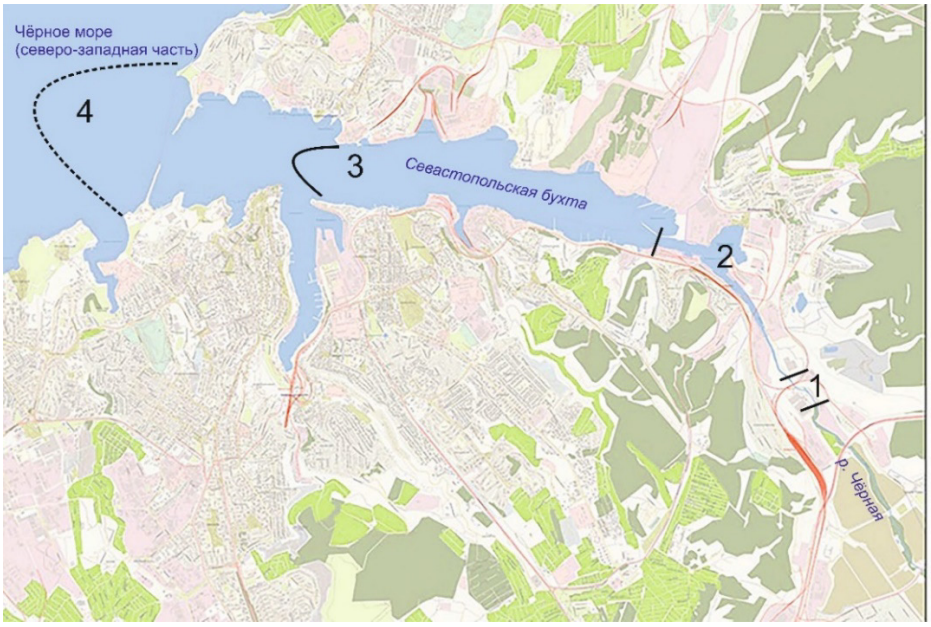


Рисунок 1. Устье р. Чёрной, включающее: 1 – устьевой участок реки; 2 – искусственный водный объект («Инкерманский лиман»); 3 – Севастопольскую бухту; 4 – прилегающую часть Чёрного моря
Figure 1. The mouth of the Chernaya River, which includes: 1 – the mouth of the river; 2 – an artificial body of water («Inkerman Estuary»); 3 – Sevastopol Bay; 4 – the adjacent part of the Black Sea



Рисунок 2. Зарастание и эвтрофирование устьевого участка р. Чёрной в 2023–2026 гг.
Figure 2. Overgrowth and eutrophication of the mouth of the Chernaya River in 2023–2026

По данным [6] увеличение солёности воды устьевого участка р. Чёрной может негативно сказываться на макрозообентосе, так как более благоприятные условия обитания моллюсков приурочены к пресноводной среде устья. По мере осолонения увеличивается средняя численность (почти в 3 раза) и уменьшается средняя биомасса (в 5 раз) макрозообентоса. С 2000-х годов в Севастопольской бухте и на устьевом участке р. Чёрной обнаруживают вселенцев из Чёрного моря, что, очевидно, связано с процессами осолонения [6]. Увеличение солёности устьевого участка р. Чёрной уже привело к снижению численности и биоразнообразия ихтиоцена, к вытеснению и замещению пресноводных видов солоноводными [10]. Аналогичное исследование влияния осолонения на зоопланктон Азовского моря и устья р. Дон, предпринятое в [11], показало, что за 10 лет увеличение солёности воды Таганрогского залива на 0,6 ‰ в год способствовало трансформации видового состава (виды пресноводного комплекса были вытеснены морскими сообществами) и уменьшению видового разнообразия в 1,5 раз.

В устье р. Чёрной, в «Инкерманском лимане» и его узкой части, переходящей в устьевой участок реки (см. рисунок 1), сообщество микроводорослей отличается наибольшим разнообразием, по сравнению с рекой и Севастопольской бухтой [12]. Здесь же увеличение солёности водной среды в период межени способствует увеличению индекса трофности [9], в этот сезон по данным [12] вода оценивается как эвтрофная, а местами сильно эвтрофированная.

Проникновение в придонном слое более солёной воды из Севастопольской бухты на устьевой участок реки способствует обострению стратификации и увеличению до 10 ‰/м вертикального градиента плотности (температуры и солёности воды) в слое скачка, который может сохраняться в течение 5 суток и более, что относится к особо опасным явлениям [2]. При таких условиях замедленный вертикальный обмен приводит к дефициту кислорода в придонном слое воды, что может способствовать появлению сероводорода и даже вызывать заморные явления [13]. Анаэробные условия в верхнем слое донных отложений, риск которых увеличивается при обострении стратификации, обусловлены высоким содержанием органического углерода и значительной скоростью потребления кислорода, затрудненными водообменом и диффузией кислорода между придонным слоем воды и тонкодисперсными отложения, характерными для устья р. Чёрной [13].

Таким образом, процесс осолонения и связанные с ним изменения абиотических и биотических компонентов экосистемы устья р. Чёрной приводят к:

- увеличению солёности воды устьевого участка реки и изменению качества среды обитания гидробионтов;
- возникновению слоя скачка плотности, температуры и солёности, препятствующего вертикальному водо-, соле-, тепло- и газообмену;
- увеличению поступления органических и химических веществ в воду, донные отложения и их накоплению;
- развитию гипоксии и продуцированию локального сероводорода;
- застойным явлениям и эвтрофикации поверхностного слоя воды.

Указанные негативные процессы, приводящие к ухудшению экологических условий в Севастопольском регионе, особенно остро проявляются в засушливый период года, когда сток реки минимальный, температура воздуха и испарение максимальны и преобладает маловетрие. При этом, в условиях усиливающейся засушливости климата [14], наибольший ущерб экономике и хозяйственной деятельности следует ожидать от засух, так как от них в 2 раза больше ущерба, чем от наводнений. Чаще всего засуха в устьевом регионе р. Чёрной отмечается в августе (раз в 3–4 года), в пик туристического сезона, когда население г. Севастополя увеличивается почти вдвое, а запасы воды в Чернореченском водохранилище и подземных горизонтах значительно уменьшаются. По данным [15] глобальное потепление климата проявляется не только в уменьшении атмосферных осадков, но и в увеличении частоты засух и их продолжительности. Повторяемость

и интенсивность аномально жарких периодов, рост дефицита пресной воды при подъёме уровня моря и увеличении температуры воздуха, как и нерациональная хозяйственная деятельность, повышают ущербы от засух. Так, увеличение «средней глобальной температуры приповерхностного слоя воздуха на 20 % снижает объём возобновляемых водных ресурсов в вододефицитных регионах» на 7 % [16]. Крым и Севастопольский регион относятся именно к таким районам Российской федерации, в которых нерешённая «водная проблема» и рост населения, желающего жить на побережье Чёрного моря, приводят к конфликтному природопользованию и ущербам.

Наиболее опасны 2–3-х месячные засухи, обычно они наблюдаются летом, когда отмечается максимальная температура воздуха. Двухмесячные засухи повторяются раз в 6 лет [15]. Они наносят урон водоснабжению города, сельскому хозяйству, рекреации. Трёхмесячная засуха по данным [15] наблюдалась 1 раз за последние 50 лет, в 1984 г., и продолжалась с мая по июль. Ранее, в 1958 г., отмечалась 3-х месячная засуха с июля по сентябрь. Для характеристики засух в Крыму использовался анализ изменчивости температуры воздуха, максимальные значения которой отмечались в июле и августе.

При этом, влияние засух, в том числе и экстремальных, на режим и качество воды низовьев крымских рек не изучалось. Не исследовался и вопрос влияния засушливого периода на солёность воды устьевых взморьев, водо- и солеобмен между взморьями и устьевыми участками рек, проникновением в речные русла солёной воды при минимальном речном стоке. Так как солёность поверхностного слоя воды подвержена существенной изменчивости под влиянием речного стока, сточных вод г. Севастополя, испарения и других факторов, она выбрана в качестве предмета исследования и критерия изменения состояния водной среды устья.

Актуальность исследования реакции водной среды морских устьев рек Крыма на экстремальное ухудшение природных условий, связанное с засухами, не вызывает сомнений. Изменение абиотической составляющей экосистемы устья р. Чёрной, обусловленное потеплением климата и дефицитом водных ресурсов, негативно сказывающиеся на экологических условиях Севастопольского региона, недостаточно изученный процесс.

Цель работы: дать оценку влияния засух на солёность устьевого взморья р. Чёрной в современный климатический период. Для этого проанализированы: изменчивость основных факторов формирования стока (температуры воздуха и слоя осадков на метеостанции Ай-Петри), распределение солёности воды устьевого взморья в период низкой межени и среднего многолетнего стока р. Чёрной, влияние на устье реки экстремальной засухи 2025 г.

Полученные результаты могут быть использованы для решения широкого спектра научно-прикладных задач геофизических и смежных наук, разработки практических рекомендаций по усовершенствованию природопользования в Севастопольском регионе, а также для моделирования масштабов влияния засух на морские устья рек.

Материалы и методы

Для анализа процессов осолонения устьевого взморья р. Чёрной в засушливые периоды года использовались материалы многолетнего мониторинга основных характеристик гидрометеорологического режима реки и Севастопольской бухты, осуществляемого Федеральным государственным бюджетным учреждением науки «Федеральный исследовательский центр «Морской гидрофизический институт РАН»» (МГИ РАН) с 1998 г., Севастопольским отделением Федерального государственного бюджетного учреждения «Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова» (СО ГОИН) и Федеральным государственным бюджетным учреждением «Крымское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» (Крым УГМС) с 1991 г. Система мониторинга показана на рисунке 3. С 1986 г. стационарные наблюдения за солёностью воды на МГ-II Севастополь не производятся [17], что

негативно сказывается на качестве мониторинга водной среды устья, а также снижает эффективность расчётных методов и моделирования опасных процессов и явлений.

Измерения солёности воды выполнялись гидрометрическими зондами ГАП-АК-12Р и ГАП-К-12Р, а также рефрактометром RHS-10/ATC и компактным анализатором воды HI 99301. Точность определения солёности воды (в зависимости от её значений и температуры) составляла ±0,04–1,9 ‰. Расхождения при параллельном определении солёности воды разными методами не превышали ±5 %. Проанализированы материалы 147 океанографических съёмок за 1991–2025 гг.

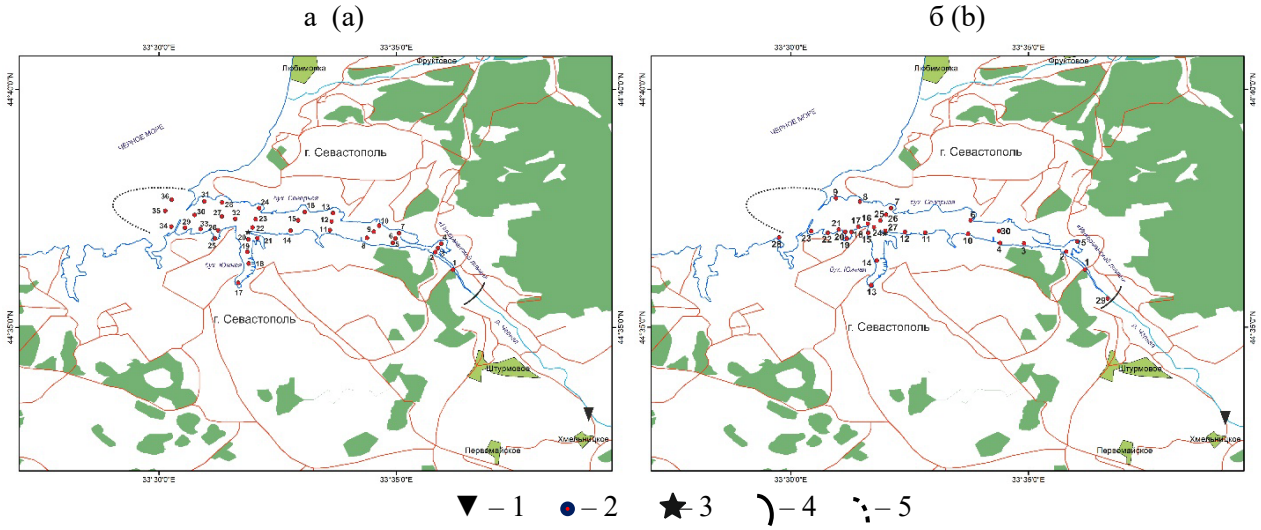


Рисунок 3. Сеть станций мониторинга в устье р. Чёрной в 1998–2024 гг. (а) и в 1925 г. (б): 1 – гидрологический пост Росгидромета (г/п Хмельницкое), 2 – станции океанографических съемок МГИ РАН, 3 – морская гидрометеорологическая станция Павловский мыс (МГ-II Севастополь), 4, 5 – речная и морская границы устья р. Чёрной

Figure 3. The network of monitoring stations at the mouth of the Chernaya River in 1998–2024 (a) and in 1925 (b): 1 – hydrological gauging station of the Russian Hydrometeorological Service (Khmelnitskoye g/s), 2 – the oceanographic survey stations of Marine Hydrophysical Institute of the Russian Academy of Sciences, 3 – Pavlovsky Cape marine hydrometeorological station (MH-II Sevastopol), 4, 5 – river and sea borders of the mouth of the Chernaya River

Однородность рядов наблюдений указанных организаций за солёностью воды, определяемой разными методами, установлена ранее в работе [5], что позволило объединить данные наблюдений в единый ряд. По океанографическим съёмкам (см. рисунок 3 а), выполненным МГИ РАН в Севастопольской бухте в разное время суток в течение 2–3 дней, не всегда можно было построить реальное распределение солёности воды в её акватории из-за существенной изменчивости гидрометеорологических характеристик под действием ветра и волнения, поэтому около 3 % данных не использовалось для анализа. Чтобы выявить закономерность изменчивости солёности воды от речного стока рассматривались случаи, когда сгонно-нагонные явления не были выражены из-за маловетрия, что обычно наблюдалось в период межени, которая отмечается большую часть года, лишь изредка прерываясь кратковременными паводками.

Так как максимальное влияние стока малых рек на состояние их устьев проявляется в поверхностном и тонком приповерхностном слоях воды [18], работа ограничена рассмотрением изменчивости солёности не глубже 0,5 м. Критерием осолонения Севастопольской бухты считалось увеличение солёности поверхностного слоя воды её восточной части до 18,2 ‰ и выше, т.е. равной или большей средней многолетней солёности воды центральной части северо-западного шельфа Чёрного моря [17].

Главный недостаток анализируемых материалов – несовпадение времени океанографических съёмок МГИ РАН и СО ГОИН с характерными расходами воды и опасными гидрометеорологическими явлениями.

К засухам относились периоды с повышенной температурой воздуха (основного фактора испаряемости), пониженным количеством осадков и водоносности рек. В соответствии с Перечнем региональных критериев опасных природных гидрометеорологических явлений[1], они наблюдались при отсутствии эффективных осадков (сумма осадков ≤5 мм/сут) в течение ≥30 дней подряд при максимальной температуре воздуха ≥30,0 °С, наблюдающейся в 75 % продолжительности периода. Но, в Севастопольском регионе засуха возможна и при менее высоких температурах воздуха.

Выбранный для анализа период наблюдений (1991–2025 гг.) за средней многолетней температурой воздуха и годовой суммой осадков на метеостанции (м/с) Ай-Петри, средним многолетним и минимальным стоком р. Чёрной на гидропосту (г/п) Хмельницкое, а также экспедиционных наблюдений МГИ РАН и СО ГОИН в Севастопольской бухте, включал пять циклов маловодных и многоводных лет. Значимость тенденций определялась с использованием критерия Фишера.

Кроме данных стационарных пунктов наблюдений Росгидромета, использовались измерения расхода воды в вершине морского устья р. Чёрной, расположенной ниже г/п Хмельницкое на 8 км, выполненные Отделом гидрофизики шельфа МГИ РАН и СО ГОИН. Впервые, в период трёхмесячной засухи 2025 г., обследованы реки бассейна р. Чёрной, сделаны синхронные измерения расхода воды на г/п Хмельницкое, в вершине морского устья, а также океанографическая съёмка устьевого взморья по сокращённой программе наблюдений (см. рисунок 3 б). К сожалению, выполнить более подробные исследования не удалось по объективным причинам. Хотя случай осолонения Севастопольской бухты, отмечавшийся в августе 2025 г., уникален, измерения производились только в поверхностном слое воды, т.е. солёность в придонном слое могла иметь равное или бóльшее значение.

Обсуждение результатов

Анализ факторов формирования водного режима устья р. Чёрной показал, что в последние 35 лет годовой слой осадков в зоне формирования стока реки составлял 996 мм (533–1508 мм), средний слой осадков в бассейне реки – 430 мм, средняя годовая температура воздуха – 6,7 °С (4,5–8,5 °С), средний годовой расход воды в замыкающем створе (г/п Хмельницкое) – 1,72 м^3/с (0,43–3,46 м^3/с). Минимальный расход воды изменялся в пределах 0,053–1,04 м^3/с и в среднем был равен 0,52 м^3/с (рисунок 4). При этом в устье р. Чёрной (см. рисунок 1), по данным МГ-II Севастополь, средняя годовая температура воздуха составляла 13,4 °С, а сумма осадков – 395 мм.

Более тёплым годам соответствовали низкие значения суммы осадков, а в холодные годы осадков выпадало больше. Сток реки в нижнем бьефе Чернореченского водохранилища такой закономерности в явном виде не имел, так как регулируется сбросами, нивелирующими его внутригодовой ход и межгодовые вариации (см. рисунок 4).

[1] Перечень региональных критериев опасных природных гидрометеорологических явлений (ОЯ), утверждённого Приказом Крымского УГМС № 113 от 27.11.2025. https://meteo-crimea.ru/?page_id=2598 Дата обращения 05.06.2026.

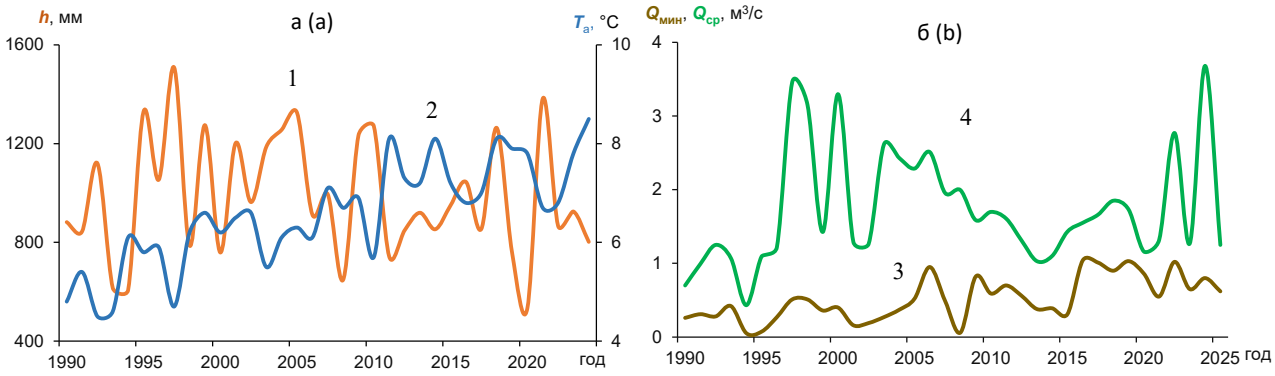


Рисунок 4. Изменчивость температуры воздуха, слоя осадков на м/с Ай-Петри (а), минимального и среднего годового расхода воды р. Чёрной на г/п Хмельницкое (б):
1 – сумма осадков за год; 2 – средняя годовая температура воздуха;
3 – минимальный расход воды; 4 – средний годовой расход воды

Figure 4. Variability of air temperature, precipitation layer on the Ai-Petri m/s (a), minimum and average annual water consumption of the Chernaya River in the Khmelnitsky g/s (b):
1 – the amount of precipitation per year; 2 – average annual air temperature;
3 – minimum water consumption; 4 – average annual water consumption

В устье реки поступало в среднем только 15 % (2÷35 %) речного стока от измеренного на г/п Хмельницкое [19], так как в нижнем течении реки осуществляется водозабор для нужд г. Севастополя. Размах измеренных в меженный период расходов воды в вершине устья (см. рисунок 1) был в пределах 0,62 м^3/с, исключая зимы 1997 и 2024 годов, когда осуществлялись аварийные сбросы из Чернореченского водохранилища [4] и сток в вершине устья был таким же, как на г/п Хмельницкое. Значимых трендов в изменении суммы осадков за год и среднего годового стока р. Чёрной в низовьях реки не обнаружено (см. рисунок 4). Однако в современный период отмечалась положительная тенденция солёности воды, из-за роста испарения, равная 0,05–0,06 ‰/год. Температура воды увеличивалась в среднем на 0,07 °С/год [5]. В настоящее время многоводная фаза многолетнего цикла стока р. Чёрной, очевидно, сменилась маловодной (см. рисунок 4).

В рассматриваемый период (1991–2025 гг.) особенно засушливыми были 1994, 2001, 2008, 2015, 2021 и 2025 годы (см. рисунок 4). То есть, в основном, значительные засухи наблюдались раз в 7 лет, как и в предшествующие климатические периоды. Такая же цикличность (в среднем 7-летняя) в изменчивости температуры воздуха и суммы осадков на м/с Ай-Петри для периодов в 30–35 лет (цикл Брикнера) отмечалась и в предыдущих 30–35-летних периодах [20].

Компенсационные сбросы из Чернореченского водохранилища поддерживали водоносность нижнего участка реки, что было необходимо для бесперебойного водоснабжения г. Севастополя. Но, дефицит осадков и высокая температура воздуха приводили к пересыханию малых рек и прудов в бассейне р. Чёрной, истощению водных запасов Чернореченского водохранилища и подземных вод. В 1994 г. в Крыму пересохло 2 водохранилища, а количество воды в остальных снизилось до уровня мёртвого объёма. При таких условиях отмечался значительный ущерб сельскому хозяйству, а в населённых пунктах вводился особый режим водоснабжения.

Значимый тренд средней годовой температуры воздуха, 0,08 град/год (см. рисунок 4), обусловленный глобальным потеплением климата, способствует увеличению испарения с водной поверхности Чёрного моря и устьевого взморья р. Чёрной. Это, а также трансгрессия моря, обусловливают осолонение поверхностного слоя воды рассматриваемого устья [5]. Повторяемость осолонения восточной части Севастопольской бухты составляла около 20 %. Поскольку приток речной воды в вершину

устья примерно постоянен (низовья реки после сооружения Чернореченского водохранилища не пересыхали), в районах 1, 2 (см. рисунок 1) контрастность, при взаимодействии пресной и солёной воды, увеличивается. При слабоветрии и штиле, обычно в межень, стратификация воды усиливалась, возникал слой скачка плотности, препятствующий вертикальному обмену, и отмечался дефицит растворённого кислорода (процент насыщения кислородом был ниже 30 %) в 4 % случаев на устьевом участке р. Чёрной и в 2 % случаев в прилегающей к нему акватории устьевого взморья. На устьевом участке реки, в канале «Река Чёрная» и в «Инкерманском лимане» концентрация растворённого кислорода была ниже ПДК[2] (6 мг/дм^3) в 8–9 % случаев, а в прилегающей части Севастопольской бухты – зафиксирована в 3 % океанографических съёмок. Такие ситуации заметно ухудшали экологические условия в Севастопольском регионе.

На рисунках 5, 6 показано распределение солёности верхнего слоя воды устьевого взморья р. Чёрной при средних и экстремальных гидрометеорологических условиях.

При среднем многолетнем режиме стока р. Чёрной (1,72 м^3/с) и средних многолетних погодных условиях формируется поле солёности, представленное на рисунке 5 а. Распресняется бóльшая часть Севастопольской бухты, осолонение до 18 ‰ и выше отмечается преимущественно в её западной части. Наиболее распреснёнными участками остаются кутовые части бухт, причём Южная и Артиллеристская бухты распресняются сточными и подземными водами. Гидрофронтальная зона локализуется в узкой части «Инкерманского лимана» (см. рисунок 6 б).

Бóльшую часть года в водном режиме устья отмечается межень (на г/п Хмельницкое средний многолетний меженный расход воды составлял 1,38 м^3/с), осадков выпадает мало, речной (средний минимальный – 0,83 м^3/с, абсолютный минимум – 0,053 м^3/с), склоновый и подземный стоки минимальные и имеют повышенную минерализацию, устьевое взморье максимально осолоняется (см. рисунок 5 б). Вода, солёностью более 19 ‰, занимает половину акватории Севастопольской бухты, гидрофронтальная зона смещается по направлению к устьевому участку реки и градиенты солёности (горизонтальные и вертикальные) увеличиваются.

В 2025 г. в Крыму рано наступил засушливый период, с марта осадков выпало менее 30 % нормы, а с июля в регионе установили режим природной чрезвычайной ситуации[3]. Из-за отсутствия осадков в мае–июле поступление воды в Чернореченское водохранилище прекратилось, реки, включая р. Чёрную, пересохли. По данным Крымского УГМС, наполнение Чернореченского водохранилища в конце июля 2025 г. составляло 34 % от его полезного объёма. По данным натурных исследований МГИ РАН и СО ГОИН, в результате трёхмесячной засухи, пересохли не только реки, питающие единственный источник водоснабжения Севастополя, но и впадающие в р. Чёрную, ниже плотины водохранилища, притоки: Уркуста, Байдарка, Уппа, Айтодорка и Сухая. Также местами полностью пересыхали реки Кача и Бельбек, образуя «слепые устья». В нижнем течении р. Чёрной постоянный сток поддерживался сбросами из водохранилища и приток пресной воды в Севастопольскую бухту оставался постоянным.

[2] Приказ от 26 мая 2025 г. № 296 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения». Зарегистрировано в Минюсте России 2 июня 2025 г. № 82497. https://www.consultant.ru/. Дата обращения 29.05.2026.

[3] Месячные обзоры погоды за 2025 г. Федеральное государственное бюджетное учреждение «Крымское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» (Крым УГМС) https://meteo-crimea.ru/. Дата обращения 19.11.2025.

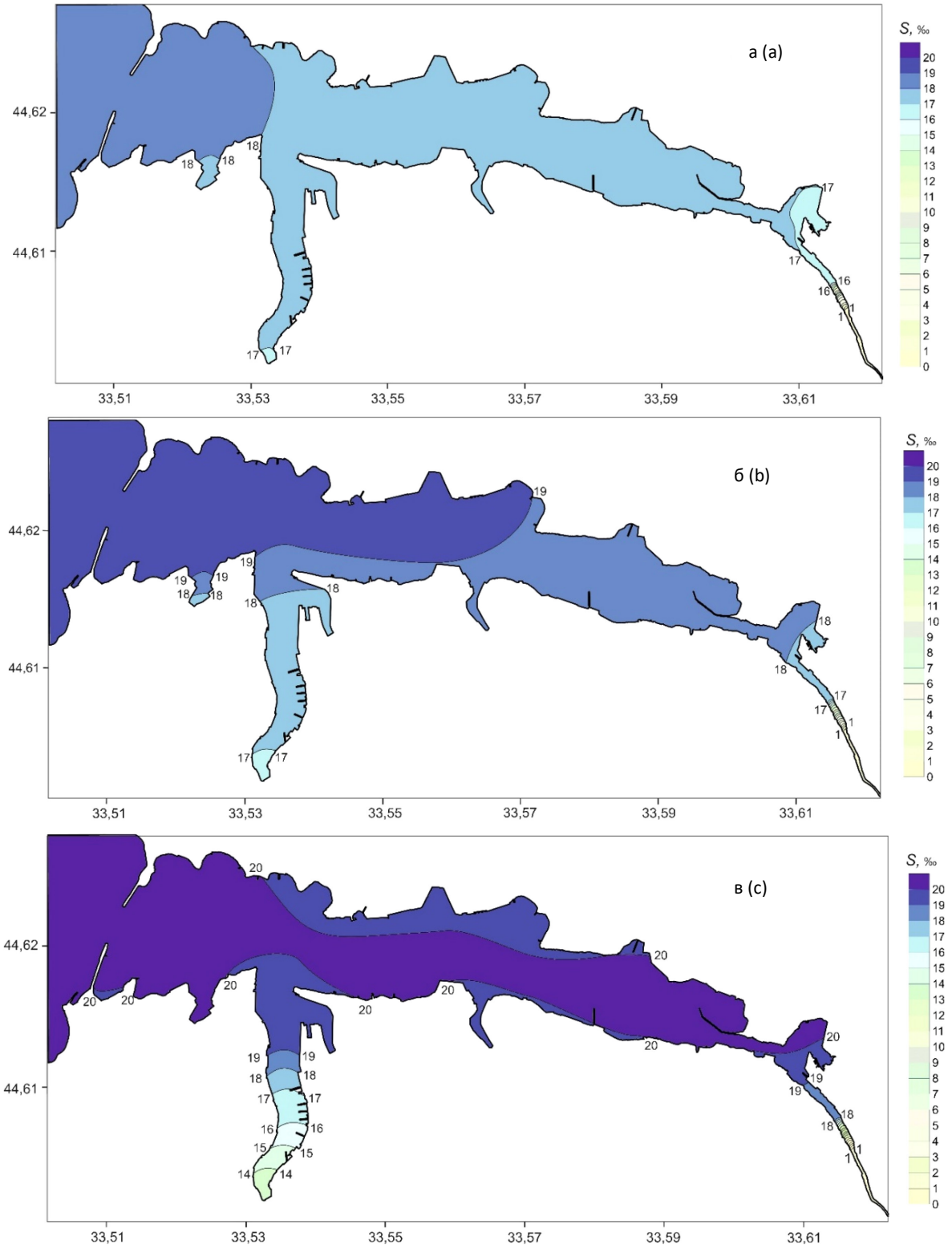


Рисунок 5. Распределение солёности поверхностного слоя воды в устье р. Чёрной: а – при среднем многолетнем стоке на г/п Хмельницкое (а), среднем стоке межени (б) и засухе летом 2025 г. (в)

Figure 5. Distribution of the salinity of the surface water layer at the mouth of the Chernaya River: a – with an average long-term runoff at the Khmelnitskoye g/s (a), an average runoff of the low water period (b) and in drought the summer of 2025 (c)

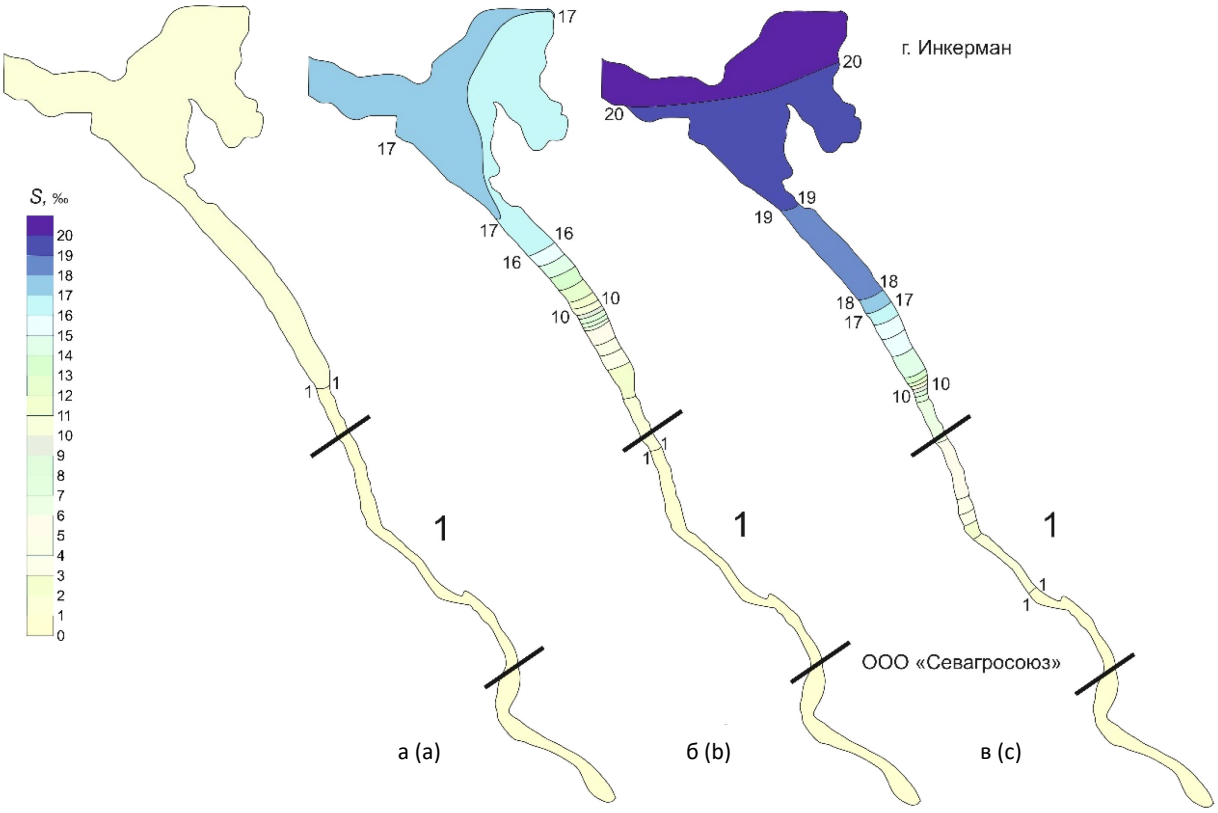


Рисунок 6. Изменчивость солёности поверхностного слоя воды устьевого участка р. Чёрной и прилегающей части устьевого взморья при разном расходе воды на г/п Хмельницкое, м^3/с: а – 28,0; б – 1,72; в – 0,62; 1 – устьевой участок р. Чёрной

Figure 6. Variability of the salinity of the surface water layer of the mouth of the Chernaya River and the adjacent part at different water flow rates in the Khmelnitsky g/s, m^3/s: a – 28.0; b – 1.72; c – 0.62; 1 – the mouth section of the Chernaya River

В период натурных исследований 28.08.2025 температура воздуха изменялась в пределах 28–32 °С, температура воды – 24–27 °С, осадков не было, преобладал штиль и восточный ветер скоростью 2 м/с. Распределение солёности поверхностного слоя воды показано на рисунках 5 в и 6 в. Солёная морская вода (20 ‰), при расходе р. Чёрной на г/п Хмельницкое 0,62 м^3/с и 0,16 м^3/с в вершине устья (что соответствовало средним многолетним условиям меженного периода стока), занимала бóльшую часть Севастопольской бухты, проникала в «Инкерманский лиман» и на устьевой участок реки (см. рисунок 6 в).

В засушливый период 2025 г. на устьевых взморьях рек Бельбека и Качи солёность воды также достигала максимальных значений – 19–20 ‰, а на их устьевых участках солёность стоячей воды в «слепых устьях» изменялась в пределах 2–17 ‰. Следовательно, осолонение в результате низкой водоносности рек в 2025 г. было характерно для шельфа северо-западной части Чёрного моря из-за низкого стока рек Дуная и Днепра. Очевидно, отсутствие регулирующего влияния на сток р. Днепр Каховского водохранилища (плотина которого была разрушена в 2023 г.) усилило негативный эффект низкой межени на устьевое взморье рек Днепра и Южного Буга, а также акваторию черноморского шельфа, включая прибрежную часть юго-западного Крыма.

Из рисунков 5, 6 видно, что фронтальная зона в морском устье малой реки, с таким типом устьевого взморья [2], имеет сложную конфигурацию из-за многофакторного влияния на термохалинную структуру. Локальные гидрофронты формируются на устьевом участке реки и прилегающей к нему искусственно созданной в середине XX в. акватории, а также в бухте Южной, куда сток р. Чёрной обычно не распространяется.

Несмотря на то, что р. Чёрная относится к малым рекам (её длина 35 км), речной сток, хотя и небольшой, оказывает существенное влияние не только на устьевой участок реки, но и на всё устьевое взморье [2]. Однако в узкой 2- километровой (от вершины устья) зоне взаимодействие разнородных вод имеет наиболее выраженный характер, градиенты и изменчивость всех абиотических характеристик в этой части устья наибольшие (см. рисунок 6). Здесь чаще всего образуется локальный гидрофронт, в котором горизонтальные градиенты достигают 0,5 ‰/м, а вертикальные 10 ‰/м. Таких значительных горизонтальных градиентов в устьях больших рек северо-западной части Чёрного моря (по данным МГИ и СО ГОИН) не обнаружено. В условиях засухи и осолонения бухты контрастность взаимодействующих вод возрастает и градиенты плотности, солёности и температуры максимальны (см. рисунки 6 б, в). Ранее было установлено [8], что гидрофронтальная зона подвержена суточным продольным перемещениям под влиянием бризовой, приливно-отличной и сгонно-нагонный циркуляций.

В паводок средней величины (см. рисунок 6 а) устьевой участок реки заполнялся пресной водой. При среднем многолетнем стоке реки (см. рисунок 6 б), в современный климатический период, клин солёной воды стал поступать на устьевой участок реки, даже в поверхностном слое воды солёность увеличивалась до 1 ‰. Летом 2025 г., в период засухи, на устьевом участке реки солёность воды изменялась в пределах 1–6 ‰ (рис. 6 в), т.е. достигала критериальных значений для пресноводных гидробионтов [21], что неблагоприятно сказывается на их жизнедеятельности.

Здесь же, кроме изменений солёности воды, на биотическую составляющую устьевой экосистемы влияют резкие колебания температуры воды, дефицит кислорода и загрязнение водной среды, обусловленное антропогенным воздействием. На устьевом участке реки расположена агрофирма ООО «Севагросоюз» (см. рисунок 6), осуществляющая сбросы сточных вод в р. Чёрную. По данным [22] в районе водовыпуска агрофирмы «Севагросоюз» отмечается повышенное содержание биогенных веществ и их количество в воде возрастает.

Трансформация загрязняющих и биогенных веществ в условиях экстремального осолонения устьевого участка р. Чёрной, при установленных для пресноводного приёмного объекта допустимых сбросах сточных вод, недостаточно изучена. Это делает проблематичным прогноз влияния стоков агрофирмы и фермерских хозяйств на окружающую природную среду в условиях потепления климата и истощения водных ресурсов в период засух.

Кроме негативного влияния засух на устье р. Чёрной, с проблемой низкой межени рек, питающих основной источник поверхностных вод (Чернореченское водохранилище), тесно связана проблема водообеспечения, экологического благополучия и безопасности в Севастопольском регионе. Необходимость реконструкции единственного водохранилища, истощение водных ресурсов в маловодные периоды, повышение минерализации подземных вод в условиях активизации водозабора из них – обусловливают целесообразность создания дополнительного источника пресной воды на территории г. Севастополя. Таким резервом водных ресурсов могло бы стать сооружение водохранилища в Камышловской балке в бассейне р. Бельбек. По предварительным расчётам, выполненным в МГИ РАН, эффективность аккумуляции паводочного стока р. Бельбек (более многоводной, чем р. Чёрная) в прирусловой Камышловской балке достаточно высока, даже при минимальных затратах. Например, при высоте дамбы 30 м и без гидроизоляции ложа водохранилища, может быть обеспечено покрытие водного дефицита в объёме 30 млн $м^3$, возникающего в период засух, аналогичных 1958, 1984 и 2025 гг.

Таким образом, организация МГИ РАН и СО ГОИН эпизодических, неэквидистантных наблюдений за состоянием устья р. Чёрной только частично решает проблему мониторинга и не позволяет фиксировать все особенности влияния природно-антропогенных изменений на состояние водной среды и экосистему устья при экстремальных ситуациях (паводки, засуха),

исследовать устьевые процессы взаимодействия речной и морской воды. Эта проблема могла бы быть решена путём восстановления стационарных наблюдений за солёностью воды Росгидромета на МГ-II Севастополь, а также организации автоматизированной системы наблюдений в районе г. Инкермана.

Заключение

Установлено, что в современный 35-летний период случаи аномального осолонения устьевого взморья и устьевого участка р. Чёрной при различном стоке межени и маловетрии составляют около 20 % от 147 океанографических съёмок. В условиях межени и засухи фронтальная зона в устьях малых рек может формироваться на локальных участках, протяжённостью 0,2–1,0 км, с горизонтальными градиентами солёности воды до 0,5 ‰/м. В устьях больших рек северо-западной части Чёрного моря таких существенных горизонтальных градиентов солёности воды не было зафиксировано.

Впервые получены результаты синхронных измерений расхода воды реки и солёности поверхностного слоя воды от г/п Хмельницкое до морской границы устья р. Чёрной. Оказалось, что в период засухи 2025 г. солёность устьевого взморья может достигать 20 ‰, чего в предыдущих исследованиях не отмечалось. Аномальная солёность поверхностного слоя воды относительно мелководной Севастопольской бухты в условиях повышенного испарения и низкой межени может быть выше, чем в северо-западной части Чёрного моря, которая распресняется стоком рек Дуная, Днестра и Днепра.

Процессы экстремального осолонения пресноводных и солоноводных акваторий и их влияние на состояние устьев малых рек Севастопольского региона изучено недостаточно. Однако увеличение солёности устьевых участков рек может вызывать проблемы природопользования, потому что губительно влияет не только на биотические составляющие устьевых экосистем, но и изменяет условия допустимого воздействия на окружающую среду сбросов сточных вод, рассчитанных для условий пресного водотока (например, р. Чёрной).

Отсутствие стационарных наблюдений за солёностью воды в Севастопольском регионе, критерием взаимодействия реки и моря, снижает качество мониторинга состояния морского устья р. Чёрной в условиях глобального и регионального изменения климата и уровня хозяйственной деятельности. Решением этого вопроса может быть организация автоматизированной системы наблюдений на МГ-II Севастополь и в районе г. Инкермана.

Устранение проблемы дефицита пресноводных ресурсов и его негативного влияния на водную среду устьевого взморья р. Чёрной видится в сооружении резервного водохранилища в Камышловской балке, в долине р. Бельбек. Это снизило бы нагрузку на Чернореченское водохранилище и низовья р. Чёрной в период засух. Улучшению экологического состояния устьевого участка р. Чёрной будут способствовать: усовершенствование системы водоснабжения и водопользования в Севастопольском регионе, ликвидация дамбы и сооружение на её месте моста в вершине устья, что увеличит пропускную способность русла и восстановит естественный водообмен между рекой и морем, а также усиление контроля за несанкционированными изъятиями и сбросами воды в бассейне р. Чёрной.

Полученные результаты могут быть использованы для оценки проникновения солёной воды на устьевой участок р. Чёрной, обменных процессов, разработки модели формирования экстремальных ситуаций в условиях потепления климата и увеличения антропогенной нагрузки, усовершенствования системы мониторинга опасных явлений и выработки предложений по минимизации возможных от них ущербов.

Источники финансирования

Работа выполнена за счёт средств бюджета Федерального исследовательского центра «Морской гидрофизический институт РАН» в рамках темы № FNNN-2024-0016 «Исследование пространственно-временной

изменчивости океанологических процессов в береговой, прибрежной и шельфовых зонах Черного моря под воздействием природных и антропогенных факторов на основе контактных измерений и математического моделирования» (шифр «Прибрежные исследования») и СО ГОИН по теме 3-1-2 «Разработка новых методов и моделей для учёта климатической информации при решении задач снижения рисков в отраслях экономики, связанных с климатическими факторами». Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Литература / References

1. Гордеев В.В. Геохимия системы река–море. М.: ООО «СамПолиграфист», 2012. 452 с.
2. Миньковская Р.Я. Комплексные исследования разнотипных морских устьев рек (на примере морских устьев рек северо-западной части Чёрного моря). Севастополь: ФГБУН ФИЦ МГИ РАН, 2020. 364 с. DOI: 10.22449/978-5-6043409-2-9.
3. Иванов В.А., Овсяный Е.И., Репетин Л.Н. и др. Гидролого-гидрохимический режим Севастопольской бухты и его изменения под воздействием климатических и антропогенных факторов. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006. 91 с.
4. Миньковская Р.Я., Демидов А.Н., Наривончик С.В. Влияние стока реки Чёрной (Севастопольский регион) на устьевое взморье во время паводков // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2024. Т. 6. № 2. С. 138–156. DOI: 10.34753/HS.2024.6.2.138.
   Minkovskaya R.Ya., Demidov A.N., NarivonchikS.V. The effect of the runoff of the Chernaya River (Sevastopol region) on the estuarine coast during floods. Hydrosphere. Hazard processes and phenomena, 2024, vol. 6, iss. 2, pp.138−156. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2024.6.2.138.
5. Наривончик С.В., Миньковская Р.Я., Дьяков Н.Н., Мальченко Ю.А., Щербаченко С.В. Изменчивость солёности воды устьевого взморья реки Чёрной (Севастопольский регион) в современный климатический период // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2022. Т. 4. № 4. С. 359–380. DOI: 10.34753/HS.2022.4.4.359.
   Narivonchik S.V., Minkovskaya R.Ya., Dyakov N.N., Malchenko Yu.A., Shcherbachenko S.V. Variability of water salinity in the estuarine coast of the Chernaya River (Sevastopol region) in the modern climatic period. Hydrosphere. Hazard processes and phenomena, 2022, vol. 4, iss. 4, pp. 359−380. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2022.4.4.359.
6. Макаров М.В., Витер Т.В. Пространственно-временные изменения в макрозообентосе устья реки Черной и вершины Севастопольской бухты (юго-западный Крым) // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Биология. Химия. 2021. Том 7 (73). № 4 С. 92–107.
   Makarov M.V., Viter T.V. Spatio-temporal changes in the macrozoobenthos of the Chernaya River estuary and the head of the Sevastopol Bay (southwestern Crimea). Scientific Notes of the V. I. Vernadsky Crimean Federal University. Biology. Chemistry, 2021, vol. 7 (73), no. 4, pp. 92−107. (In Russian; abstract in English).
7. Берлинский Н.А., Гаркавая Г.П., Богатова Ю.И. Проблемы антропогенного эвтрофирования и развития гипоксии в северо-западной части Черного моря // Экология моря. 2003. №. 63. С. 17–22.
8. Миньковская Р.Я., Слепчук К.А., Антоненков Д.А. Обменные процессы в устье р. Черной (Севастопольский регион) по данным комплексного мониторинга // Океанология. 2026. Т. 66. № 1. С. 28–42.

Minkovskaya R.Ya., Slepcuk K.A., Antonenkov D.A. Exchange processes in the Chernaya River estuary (Sevastopol region) based on comprehensive monitoring data. Oceanology, 2026, vol. 66, no. 1, pp. 28−42. (In Russian; abstract in English).

9. Слепчук К.А., Совга Е.Е. Уровень эвтрофирования восточного района Севастопольской бухты по результатам численного моделирования индекса E-TRIX // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. № 2. С. 53–59.
Slepcuk K.A., Sovga E.E. Eutrophication level of the eastern part of the Sevastopol Bay based on numerical modeling of the E-TRIX index. Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea, 2018, no. 2, pp. 53−59. (In Russian; abstract in English).
10. Аблязов Э.Р. Влияние межгодовой изменчивости солёности и температуры воды на структуру ихтиоцена эстуарной зоны реки Чёрная //Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2016. № 3. С. 90–94.
Abliazov E.R. Influence of interannual variability of water salinity and temperature on the structure of the fish community in the estuarine zone of the Chernaya River. Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea, 2016, no. 3, pp. 90−94. (In Russian; abstract in English).
11. Афанасьев Д.Ф., Мирзоян З.А., Мартынюк М.Л., Хренкин Д.В., Шляхова Н.А., Бычкова М.В., Жукова С.В. Раннелетний зоопланктон Азовского моря в период осолонения // Биология внутренних вод. 2019. № 2. Вып. 2. С. 51–60.
Afanasyev D.F., Mirzoyan Z.A., Martynyuk M.L., Khrenkin D.V., Shlyakhova N.A., Bychkova M.V., Zhukova S.V. Early summer zooplankton of the Sea of Azov during the salinization period. Inland Water Biology, 2019, no. 2, iss. 2, pp. 51−60. (In Russian; abstract in English).
12. Микроводоросли Чёрного моря: проблемы сохранения биоразнообразия и биотехнологического использования / Под ред. Ю.Н. Токарева, З.З. Финенко, Н.В. Шадрина; НАН Украины, Институт биологии южных морей. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. 454 с.
13. Орехова Н.А., Коновалов С.К. Формирование зон дефицита кислорода и сероводородного заражения прибрежных районов в условиях антропогенного воздействия// Труды II Всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития». С. 503–506.
14. Дегтерев А.Х. Изменение климата Крыма за последние десятилетия // Вопросы безопасности. 2020. № 2. DOI: 10.25136/2409-7543.2020.2.32821.
Degterev A.Kh. Climate change in Crimea over recent decades. Security Issues, 2020, no. 2. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.25136/2409-7543.2020.2.32821.
15. Дегтерев А.Х. Повторяемость сильных засух в Крыму и их связь с Эль-Ниньо // Вопросы безопасности. 2023. № 2. DOI: 10.25136/2409-7543.2023.2.40861 EDN: ESLAFEURL.
Degterev A.Kh. Recurrence of severe droughts in Crimea and their connection with El Niño. Security Issues, 2023, no. 2. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.25136/2409-7543.2023.2.40861.
16. Кокорин А.О. Изменение климата: обзор Пятого оценочного доклада МГЭИК / М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2014. 80 с.
17. Гидрометеорологические условия морей Украины в 2 т. Том 2: Черное море / Ильин Ю.П., Репетин Л.Н., Белокопытов В.Н. и др. Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2012. 421 с.
18. Завьялов П.О. и др. Гидрофизические и гидрохимические характеристики морских акваторий у устьев малых рек российского побережья Черного моря // Океанология. 2014. Т. 54. № 3. С. 265–280.
Zavyalov P.O. et al. Hydrophysical and hydrochemical characteristics of sea areas near the mouths of small rivers on the Russian Black Sea coast. Oceanology, 2014, vol. 54, no. 3, pp. 265−280. (In Russian; abstract in English).

19. Миньковская Р.Я., Наривончик С.В., Свищева И.А., Антоненков Д.А., Демидов А.Н. Оценка стока рек юго-западного Крыма с учетом природно-антропогенных изменений // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2025. 6(2). 191–213. DOI: 10.34753/HS.2024.6.2.191.
Minkovskaya R.Ya., Narivonchik S.V., Svishcheva I.A., Antonenkov D.A., Demidov A.N. Assessment of river runoff in southwestern Crimea taking into account natural and anthropogenic changes. Hydrosphere. Hazard processes and phenomena, 2025, vol. 6, iss. 2, pp. 191−213. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2024.6.2.191.

20. Парубец О.В. Изменение Климата в Крыму // Ученые записки Таврического Национального университета им. В.И. Вернадского. Серия География. 2009. Т.22 (61). № 2. С. 88–96.
Parubets O.V. Climate change in Crimea. Scientific Notes of the V. I. Vernadsky Taurida National University. Series Geography, 2009, vol. 22 (61), no. 2, pp. 88−96. (In Russian; abstract in English).

21. Хлебович В.В. Критическая соленость биологических процессов. Л.: Наука, 1974. 231 с.

22. Мыслина М.А., Вареник А.В., Тарасевич Д.В. Динамика концентрации биогенных элементов в водах реки Черной (Крымский полуостров) в 2015–2020 годах // Морской гидрофизический журнал. 2024. Т.40. № 3. С. 438–449. EDN UGRJUT.
Myslina M.A., Varenik A.V., Tarasevich D.V. Dynamics of nutrient concentration in the waters of the Chernaya River (Crimean Peninsula) in 2015–2020. Marine Hydrophysical Journal, 2024, vol. 40, no. 3, pp. 438−449. (In Russian; abstract in English). EDN UGRJUT.

Поступила в редакцию / Received 19.07.2026
Принята к публикации / Accepted 18.08.2026

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Миньковская Роза Яковлевна, доктор географических наук, старший научный сотрудник отдела гидрофизики шельфа, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Морской гидрофизический институт РАН», г. Севастополь, Россия; SPIN-код: 3912-8140, ORCID: 0000-0002-7936-3490, ResearcherID IQW-1459-2023, AuthorIDScopus: 56422395100; e-mail: rosmink@yandex.ru.

Демидов Александр Никитич, научный сотрудник, Севастопольское отделение Федерального государственного бюджетного учреждения «Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова», г. Севастополь, Россия; SPIN-код: 8401-4595; e-mail: sev-oazis@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Roza Ya. Minkovskaya, D. Sc. (Geography), Senior Researcher of the Shelf Hydrophysics Department, Federal State Budget Scientific Institution Federal Research Center "Marine Hydrophysical Institute of RAS", Sevastopol, Russia; SPIN-code: 3912-8140, ORCID: 0000-0002-7936-3490, ResearcherID: IQW-1459-2023, AuthorIDScopus: 56422395100; e-mail: rosmink@yandex.ru.

Alexander N. Demidov, research assistant, Sevastopol Branch of the N.N. Zubov State Oceanographic Institute, Sevastopol, Russia; SPIN-code: 8401-4595; e-mail: sev-oazis@mail.ru.

ГЛОБАЛЬНЫЕ И РЕГИОНАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИРОДЫ И КЛИМАТА
GLOBAL AND REGIONAL CHANGES OF NATURE AND CLIMATE

Научная статья / Scientific paper
УДК: 556.12: 551.582: 550.46
DOI: 10.34753/HS.2026.8.2.144

Вариация изотопного состава современных атмосферных осадков на северном побережье Черного моря (Карадагский заповедник, Крым)

С. В. Токарев[1,2], В. А. Лапченко[3], Ю. В. Дублянский[4]
[1]Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, г. Симферополь, Россия; [2]Институт водных проблем РАН, г. Москва, Россия; [3]Карадагская научная станция им. Т. И. Вяземского – природный заповедник РАН, филиал ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», пгт. Курортное, Республика Крым, Россия; [4] Институт геологии Инсбрукского университета, г. Инсбрук, Австрия
e-mail: tokcrimea@list.ru

Аннотация. Понимание закономерностей формирования изотопного состава атмосферных осадков является необходимым условием для применения изотопного метода в региональных гидрологических, гидрогеологических и палеоклиматических исследованиях. В регионах с острым дефицитом водных ресурсов, таких как Крым, проведение режимных изотопно-гидрологических работ представляется актуальной задачей. Целью исследования является выявление закономерностей и контролирующих факторов вариации изотопного состава современных атмосферных осадков на северном побережье Черного моря.

Мониторинг изотопного состава (δ^2H и $\delta^{18}O$) атмосферных осадков проводился на территории Карадагского природного заповедника (юго-восток Крыма) в течении 4 лет (2020–2024 гг.) по методике GNIP. Результаты измерений позволили построить локальную линию метеорных вод (ЛЛМВ) для изучаемого района, описываемую уравнением $\delta^2H = 7\delta^{18}O + 3{,}3$ ($R^2 = 0{,}96$). Она несколько отличается от полученной ранее ЛЛМВ для центральной части Крыма, что, предположительно, связано с более значительным дефицитом увлажнения изучаемого района. В динамике изотопных характеристик атмосферных осадков выявлена сезонность, выражающаяся в существенном обеднении осадков холодного периода года (ноябрь–март) изотопами ^2H и ^{18}O, а также повышенным показателем избытка дейтерия, по сравнению с теплым периодом (апрель–октябрь). Корреляционный анализ выявил, что наибольшее влияние на изотопный состав атмосферных осадков оказывает температура воздуха ($r \approx 0{,}7$), в то время как связь с количеством осадков не демонстрирует статистической значимости. Лишь показатель избытка дейтерия по коэффициентам корреляции Спирмена демонстрирует умеренную прямую связь с количеством и интенсивностью осадков ($\rho = 0{,}44$ и $\rho = 0{,}43$ соответственно). Изучение обратных траектории движения воздушных масс показало, что в отдельные месяцы ведущим фактором, определяющим изотопный состав атмосферных осадков, становятся источники влаги.

Ключевые слова: атмосферные осадки; мониторинг; дейтерий; кислород-18; сезонная изменчивость; локальная линия метеорных вод; контролирующие факторы; Крым; Черноморский регион.

Для цитирования: Токарев С. В., Лапченко В. А., Дублянский Ю. В. Вариация изотопного состава современных атмосферных осадков на северном побережье Черного моря (Карадагский заповедник, Крым) // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2026. Т. 8. Вып. 2. С.144–162. DOI: 10.34753/HS.2026.8.2.144.

Variation in the Isotopic Composition of Modern Atmospheric Precipitation on the Northern Coast of the Black Sea (Karadag Nature Reserve, Crimea)

Sergey V. Tokarev[1,2], Vladimir A. Lapchenko[3], Yuri V. Dublyansky[4]
[1]V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia; [2]Water Problems Institute of RAS, Moscow, Russia; [3]T. I. Vyazemsky Karadag Scientific Station – Nature Reserve of RAS, Branch of A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Kurortnoye, Republic of Crimea, Russia; [4]Institute of Geology, University of Innsbruck, Innsbruck, Austria
e-mail: tokcrimea@list.ru

Abstract. Understanding the isotopic composition of atmospheric precipitation is essential for applying stable isotope methods in regional hydrological, hydrogeological, and paleoclimatic studies. In water-scarce regions such as Crimea, systematic isotope hydrological research is a critical priority. This study aims to identify the patterns and controlling factors of stable isotope variations in modern precipitation on the northern coast of the Black Sea.
Isotopic monitoring (δ^2H and $\delta^{18}O$) was conducted at the Karadag Nature Reserve (southeastern Crimea) over a four-year period (2020–2024) following GNIP methodology. Our findings established a Local Meteoric Water Line (LMWL) for the study area, defined by the equation $\delta^2H = 7\delta^{18}O + 3.3$ ($R^2 = 0.96$). This line deviates slightly from the previously established LMWL for central Crimea, likely due to the higher aridity of the study site. Strong seasonality was observed in isotopic dynamics: precipitation was significantly depleted in ^2H and ^{18}O during the cold season (November–March) and exhibited higher deuterium excess compared to the warm season (April–October).
Correlation analysis indicates that air temperature is the primary driver of isotopic composition ($r \approx 0.7$), while the relationship with precipitation amount is not statistically significant. Only deuterium excess, as measured by the Spearman correlation coefficients, showed a moderate positive relation with precipitation amount and intensity ($\rho = 0.44$ and $\rho = 0.43$, respectively). Back-trajectory analysis of air masses revealed that in specific months, the moisture sources become the dominant factor determining the isotopic signature of precipitation.
Keywords: atmospheric precipitation; monitoring; deuterium; oxygen-18; seasonal variability; local meteoric water line; controlling factors; Crimea; Black Sea region.
For citation: Tokarev S. V., Lapchenko V. A., Dublyansky Y. V. Variation in the Isotopic Composition of Modern Atmospheric Precipitation on the Northern Coast of the Black Sea (Karadag Nature Reserve, Crimea). Hydrosphere. Hazard processes and phenomena, 2026, vol. 8, iss. 2, pp. 144–162. DOI: 10.34753/HS. 2026.8.2.144. (In Russian; abstract in English).

Введение

Соотношение δ^2H и $\delta^{18}O$ представляет собой индикатор условий и процессов формирования элементов гидросферы в ходе гидрологического цикла [1]. Соответственно, понимание закономерностей формирования изотопного состава атмосферных осадков является необходимым условием для продуктивного применения изотопного метода в региональных гидрологических и гидрогеологических исследованиях. Глобальный мониторинг изотопного состава атмосферных осадков проводится сетью станций GNIP (программа МАГАТЭ) начиная с 1960-х гг. По результатам глобального мониторинга и отдельных инициативных исследований создаются базы данных для крупных регионов, в том числе целых континентов [2, 3].

Направления применения изотопного метода в гидрологических и гидрогеологических исследованиях весьма разнообразны. Например, метод широко используется при изучении характеристик речного стока [4, 5]. Свойство воды изменять соотношения $^2H/^1H$ и $^{18}O/^{16}O$ при фазовых переходах (фракционирование изотопов) успешно применяется в оценке элементов водного баланса [6, 7]. Данные об изотопном составе современных атмосферных осадков являются основой для палеоклиматических реконструкций [8, 9]. Изотопный метод также эффективен при изучении подземного водообмена, в том числе при оценке ресурсов подземных вод [10, 11, 12].

Водные ресурсы являются одним из главных лимитирующих факторов социально-экономического развития Крыма. С 2014 г. проблема водного дефицита приобрела особую

остроту в связи с прекращением работы Северо-Крымского канала, обеспечивавшего более половины водопотребления полуострова. Сейчас регион может рассчитывать только на внутренние водные ресурсы, формируемые исключительно за счет атмосферных осадков. В последнее десятилетие в Крыму отмечается увеличение частоты неблагоприятных метеорологических явлений, таких как засухи и экстремальные ливни, сопровождающиеся катастрофическими паводками [13, 14]. На фоне происходящих климатических изменений и активного социально-экономического развития Крымского региона проведение долгосрочных режимных гидрологических исследований становится особенно актуальным. При этом изотопный метод является одним из наиболее перспективных методов этих исследований.

δ^2H и $\delta^{18}O$ атмосферных осадков характеризуется пространственной и временной изменчивостью. Последняя контролируется рядом факторов, среди которых основными являются температура образования осадков, их количество, относительная влажность воздуха, источник (место образования) атмосферной влаги и процессы, происходящие на пути ее движения к месту выпадения [1, 15, 16]. Для выявления факторов, контролирующих динамику изотопного состава осадков конкретной территории необходимы многолетние мониторинговые работы.

Ближайшие станции сети GNIP (Одесса, Ростов-на-Дону, Батуми, Синоп) расположены на удалении более 200 км от Крымского полуострова и отделены от него морскими акваториями. Исследования изотопного состава атмосферных осадков Крыма проводилось отдельными инициативными группами. Первое подобное исследование включило определение $\delta^{18}O$ в 34 пробах атмосферных осадков, отобранных на 4 пунктах в Горном Крыму в 1977–1979 гг. [17]. Более систематическое исследование изотопных характеристик атмосферных осадков было проведено на северном склоне центральной части Крымских гор: на плато массива Чатырдаг и в г. Симферополь, в 2010–2014 гг. [18]. Полученные результаты выявили довольно сложный характер сезонной изменчивости изотопного состава осадков. В результате анализа и моделирования атмосферного переноса влаги выяснено, что он контролируется сочетанием факторов, главные из которых – температура воздуха и изменение источников влаги.

Значительное разнообразие климатических условий в пределах Крымского полуострова должно сказываться на изотопных характеристиках атмосферных осадков в различных районах Крыма. Соответственно, проведение режимных изотопно-гидрологических исследований, в особенности в районах, характеризующихся высоким дефицитом увлажнения, представляется актуальной задачей. В настоящей работе приводятся результаты такого исследования, осуществляемого в юго-восточной части Крыма на территории Карадагского природного заповедника с 2020 г. Данный район представляет особый интерес для изотопно-гидрологических исследований, поскольку расположен на границе суша – море, а также на стыке двух физико-географических областей – Горного Крыма и Равнинного Крыма.

Характеристика объекта исследования

Режим атмосферных осадков в Крыму. Основными факторами пространственного распределения и режима атмосферных осадков в Крыму являются атмосферные циркуляционные процессы, рельеф полуострова и влияние окружающих морских акваторий. В атмосферной циркуляции преобладающим (75 % случаев) является западный перенос воздушных масс со стороны Атлантики. Второстепенную роль играют холодный воздух северных широт (10 %), теплый и влажный воздух со Средиземного моря (8 %) и сухой с Азии (7 %) [19]. Как отмечают [20], наибольшее количество осадков связано с западным переносом, особенно зимой (58–68 %). В весенние месяцы осадки часто отмечаются и при южном переносе (48–51 %). Значительно реже выпадают осадки при северном и, особенно, восточном переносе.

Важную роль в распределении атмосферных осадков по территории

полуострова играют Крымские горы. Они усиливают восходящие движения воздуха, что приводит к увеличению выпадения осадков в горных районах Крыма (600–1000 мм в год) по сравнению с равнинной частью полуострова (250–450 мм в год) [19]. Отмечается, что внутренние районы полуострова получают на 100–150 мм осадков в год больше, чем прибрежные районы. Уменьшение количества осадков в последних связано с влиянием моря и наиболее характерно весной и летом, когда холодная поверхность моря препятствует развитию конвекции [21]. В связи с многообразием климатических условий, на территории Крыма выделено 6 мезоклиматических районов (рисунок 1а).

Для Горного Крыма, несмотря на его относительно небольшие площадь и высоты, характерны существенные различия в пространственном и временном распределении осадков. В целом, в восточной части Крымских гор по сравнению с западной выпадает значительно (до двух раз) меньшее количество осадков. Причиной этому являются различия в региональных циркуляционных характеристиках атмосферы и орографии [22].

Циркуляционные процессы, а вместе с ними и режим выпадения осадков, имеют ярко выраженную сезонность. Для восточной части Крымских гор годовой ход осадков относится к полуконтинентальному типу с незначительным превышением сумм осадков весенне-летнего периода над осенне-зимним (соотношение от 1,00 до 1,75). Для западной части района характерен неконтинентальный тип годового хода осадков. Сумма осадков в осенне-зимний период здесь в 1,5–2,0 раза превышает их сумму в весенне-летний период [21].

Исследования источников происхождения атмосферных осадков в Крыму, выполненные с использованием лагранжевой траекторной модели LAGRANTO за период 1976–2017 гг., дали следующие результаты [18, 23]. Около 47 % осадков поставляет окружающая полуостров суша (континентальный «ресайклинг» влаги). Значительно меньшую долю осадков обеспечивает влага, приходящая напрямую со Средиземного моря (15 %), Черного моря и Атлантического океана (по 14 %). Вклад каждого из остальных источников (Азовское, Каспийское и Балтийское моря) не превышает 3 %. Среди сезонных эффектов выявлено увеличение в летнее время доли осадков со стороны суши (до 70 %) с уменьшением доли влаги, поступающей с Атлантики и Средиземного моря практически до нуля. В зимнее время наблюдается обратная картина: преобладают осадки, пришедшие с Атлантики и Средиземного моря (>50 %), а доля осадков с суши уменьшается до 25 %. Следует отметить, что для моделирования и расчетов в указанных работах использовались узловые ячейки, расположенные ближе к центральной части Крыма. Для восточной части полуострова соотношение источников поступления атмосферных осадков может быть несколько иным.

Климатические условия района работ. В физико-географическом плане район исследования имеет пограничное положение. Он находится на восточной окраине Крымских гор, где они довольно резко переходят в равнину (рисунок 1б). Также значимым является приморское местоположение района. Кроме того, он находится у северной границы субтропической зоны северного полушария. Такое географическое положение района обуславливает ряд климатических особенностей, в том числе касающихся режима атмосферных осадков. Здесь наблюдается сочетание черт морского (низкие годовые и суточные амплитуды температур) и континентального (максимум атмосферных осадков в летнее время, высокое количество ясных дней) типов климата.

Климатические условия района можно охарактеризовать по данным многолетних (с 1910 г.) метеорологических наблюдений Карадагской научно-исследовательской геофизической обсерватории (КНИГО). Она расположена у восточного подножья Карадагской горной группы в пгт. Курортное (абсолютная высота 40 м н.у.м.) (рисунок 1 В). Кроме того, в последние десятилетия метеонаблюдения проводятся на Карадагской станции фонового экологического мониторинга (СФЭМ) и Карадагском ландшафтно-экологическом стационаре (КЛЭС).

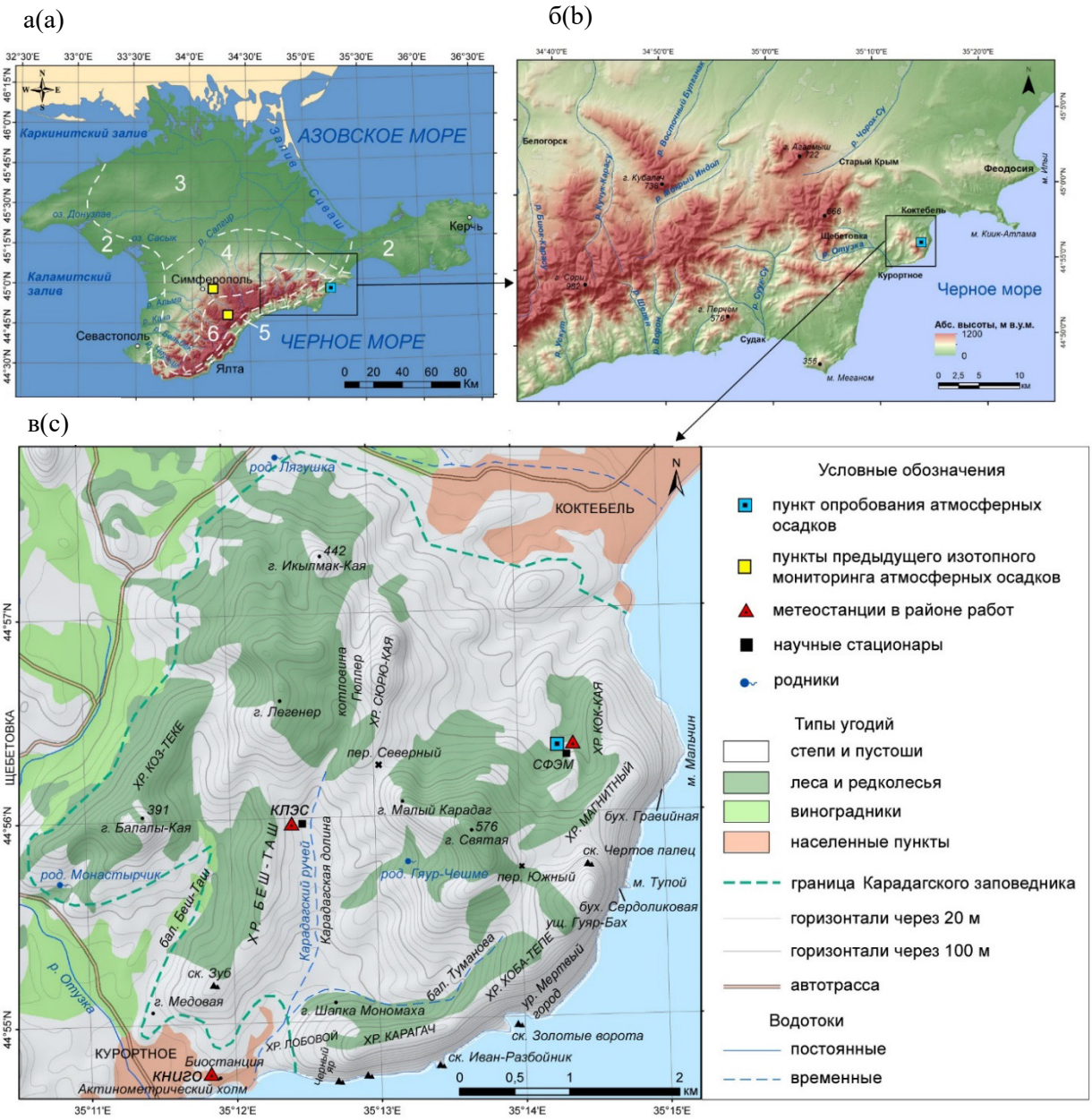


Рисунок 1. Положение пункта опробования атмосферных осадков на карте Крыма (а), среднемасштабной рельефной карте восточной части Крымских гор (б) и крупномасштабной топографической карте Карадагского природного заповедника (в). Белой штриховой линией на панели (а) показаны границы мезоклиматических районов (по [21]): 1 – побережья, 2 – прибрежный, 3 – равнинно-степной, 4 – холмистой равнины, 5 – южного предгорья, 6 – горный. КНИГО – Карадагская научно-исследовательская геофизическая обсерватория; КЛЭС – Карадагский ландшафтно-экологический стационар; СФЭМ – станция фонового экологического мониторинга

Figure 1. Location of the atmospheric precipitation sampling point on the map of Crimea (a), medium-scale relief map of the eastern part of the Crimean Mountains (b) and large-scale topographic map of the Karadag Nature Reserve (c). The white dashed line in panel (a) shows the boundaries of the mesoclimatic regions (according to [21]): 1 – coast, 2 – coastal, 3 – plain-steppe, 4 – hilly plain, 5 – southern foothills, 6 – mountain. КНИГО – Karadag Research Geophysical Observatory; КЛЭС – Karadag Landscape-Ecological Station; СФЭМ – background environmental monitoring station

Согласно данным наблюдений КНИГО, многолетняя среднегодовая температура воздуха – 12,1 °С. Средняя температура наиболее холодного месяца (февраль) составляет 1,5 °С, а наиболее жаркого (июль) – 23,6 °С. Годовая амплитуда температуры воздуха достигает 22,3 °С по среднемесячным температурам и 64 °С по абсолютным значениям [24].

Климат района засушливый. По данным наблюдений КНИГО за период 1920–2006 гг. за год в среднем выпадало 388,5 мм атмосферных осадков. Экстремальные значения годовых сумм осадков составляют 199,5 мм (1949 г.) и 683 мм (1968 г.). С начала нынешнего столетия отмечается некоторое увеличение суммы годовых осадков. За период 2000–2009 гг. она составила 425 мм по данным КНИГО и 495 мм по данным КЛЭС [25].

В течение года ход атмосферных осадков распределен относительно равномерно, однако имеются два нерезких пика: в летний (июнь–июль) и осенне-зимний (ноябрь–декабрь) периоды. В последнее десятилетие отмечается изменчивость распределения осадков по сезонам от года к году. Так, по данным наблюдений СФЭМ за 2014–2018 гг. минимум осадков приходился на летнее время и более значительное их количество выпадало весной и осенью [26]. Только 5 % осадков выпадает в виде снега. Средняя высота снежного покрова на горизонтальных поверхностях – 5 см, максимальная может достигать 35 см [24]. Подавляющая часть выпавших атмосферных осадков (87 %) расходуется на испарение и транспирацию. Годовая величина коэффициента увлажнения Высоцкого–Иванова при этом составляет 0,38 [25].

Материалы и методы исследования

Пункт опробования атмосферных осадков был устроен на базе Карадагской станции фонового экологического мониторинга (СФЭМ), расположенной на северо-восточном склоне г. Святая (44,9393° с.ш., 35,2364° в.д., 180 м н.у.м.). Участок находится в небольшом горном амфитеатре, обращенном на север и отделенном от морского побережья хребтами Магнитный и Кок-Кая (рисунок 1в).

Отбор проб атмосферных осадков на изотопный анализ проводился с июня 2020 г. по июнь 2024 г. Отбирались кумулятивные месячные пробы. При этом определялось также количество осадков, которое в дальнейшем использовалось для расчета средневзвешенных годовых изотопных характеристик. Для отбора проб использовался специализированный осадкосборник RS-1B («Palmex», Хорватия). На пункте опробования проводились метеорологические наблюдения с 3-часовой периодичностью автоматической станцией «Тропосфера–Н». До отправки в лабораторию пробы хранились при температуре 5 °С.

Измерение изотопного состава воды ($\delta^{18}O$ и $\delta^{2}H$) в отобранных пробах проводилось на анализаторе L2140i («Picarro», США) в Институте геологии Инсбрукского университета (Австрия). Для калибровки анализатора использовались лабораторные стандарты VSMOW2, SLAP2 и GISP. Результаты измерений приводятся относительно стандарта V-SMOW. Аналитическая погрешность измерений – ±0,1 ‰ для $\delta^{18}O$ и ±1 ‰ для $\delta^{2}H$.

Полученные соотношения между $\delta^{2}H$ и $\delta^{18}O$, измеренными в осадках, описываются уравнением линейной регрессии вида $\delta^{2}H = a\delta^{18}O + b$, где a и b – константы, зависящие от условий образования атмосферной влаги, ее перемещения и выпадения в виде осадков. Такая линейная аппроксимация зависимости $\delta^{2}H$ от $\delta^{18}O$ в осадках получила название линии метеорных вод [1].

По результатам измерения $\delta^{18}O$ и $\delta^{2}H$ вычислялся показатель избытка дейтерия по формуле D-excess = $\delta^{2}H - 8\delta^{18}O$ [27].

Статистический анализ результатов измерений включал вычисление линейного коэффициента корреляции Пирсона (r) и коэффициента ранговой корреляции Спирмена (ρ) между изотопными характеристиками атмосферных осадков ($\delta^{18}O$, $\delta^{2}H$, избыток дейтерия) и потенциальными контролирующими факторами (температура воздуха T, количество и интенсивность осадков, относительная влажность воздуха RH). Для вычисления коэффициента ранговой корреляции Спирмена и уровней его значимости использовался онлайн-калькулятор[1].

С целью выявления источников поступления влаги для месяцев с минимальными и максимальными значениями $\delta^{18}O$ и $\delta^{2}H$ в

[1] Коэффициент ранговой корреляции Спирмена онлайн. Режим доступа: https://math.semestr.ru/corel/spirmen.php (дата обращения 21.04.2025).

атмосферных осадках вычислялись обратные траектории движения воздушных масс. Для этого использовалась модель NOAA HYSPLIT[2].

Результаты

Режим температур и атмосферных осадков. В качестве исходных данных для оценки факторов формирования изотопного состава атмосферных осадков были использованы результаты метеонаблюдений на СФЭМ. За 4-летний срок наблюдений метеорологические показатели отличались высоким разнообразием, что особенно относится к режиму и количеству атмосферных осадков (рисунок 2а).

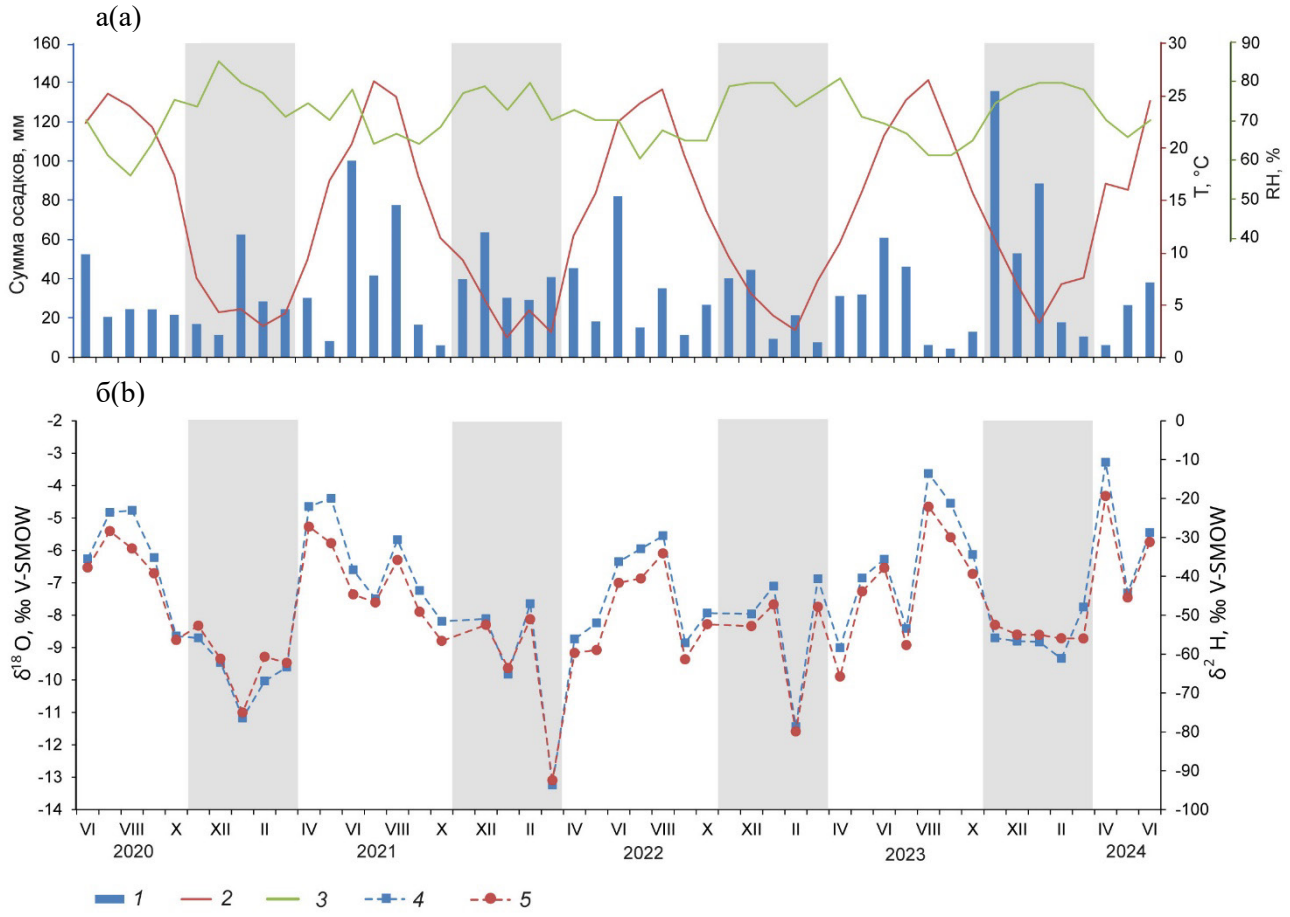


Рисунок 2. Динамика основных метеорологических характеристик (а) и изотопные характеристики атмосферных осадков (б) на Карадагской станции фонового экологического мониторинга с июня 2020 г. по июнь 2024 г. Серым фоном показаны холодные периоды года (ноябрь–март). 1 – месячные суммы осадков; 2 – среднемесячные температуры; 3 – среднемесячная относительная влажность; 4 – $\delta^{18}O$; 5 – $\delta^{2}H$

Figure 2. Dynamics of the main meteorological elements (a) and isotopic composition of atmospheric precipitation (b) at the Karadag background environmental monitoring station from June 2020 to June 2024. Cold periods of the year (November – March) are shown in gray. 1 – monthly precipitation amounts; 2 – average monthly temperatures; 3 – average monthly relative humidity; 4 – $\delta^{18}O$; 5 – $\delta^{2}H$

В течение анализируемого срока среднегодовые температуры варьировали от 12,8 °C в 2021 г. до 14,0 °C в 2023 г. В целом выявленный внутригодовой температурный режим довольно однообразный. Самые низкие среднемесячные значения температур отмечались в январе (2022 и 2024 гг.) и феврале (2021 и 2023 гг.). Наиболее жаркими месяцами были июль (2020 и 2021 гг.) и август (2022 и 2023 гг.).

[2] NOAA HYSPLIT Trajectory Model. Режим доступа: https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php (дата обращения 21.04.2025).

Режим атмосферных осадков в течение срока опробования существенно различался по годам. Вторая половина 2020 г. выдалась весьма засушливой со 120 мм выпавших осадков, что составляет 65 % от многолетней нормы. При этом июнь был дождливым: количество выпавших осадков составило 125 % от нормы. 2021 г. оказался наиболее влажным с суммой осадков 502 мм (129 % от нормы). Измеренные в последующие 2022, 2023 гг. и первую половину 2024 г. суммы выпавших осадков оказались более близкими к норме, превышая её на 8–9 %. В первые 3 года мониторинга максимальные месячные суммы осадков отмечались в июне: 52,5 мм в 2020 г., 100,2 мм в 2021 г., 82,0 мм в 2022 г. При этом норма осадков для июня по данным КНИГО – 42 мм [25]. В 2023 г. самым влажным был ноябрь (135,7 мм), в 2024 г. – январь (88,6 мм). В течение срока изотопного мониторинга минимальные суммы осадков фиксировались в различные месяцы. В 2021 г. наиболее засушливым оказался октябрь, в 2022 и 2023 гг. – сентябрь, в 2024 г. – апрель.

Широкая вариация показателей температурно-влажностного режима на пункте изотопного мониторинга, наблюдаемая в течение проводимого опробования атмосферных осадков, говорит о достаточной представительности полученной выборки для данного района.

Локальная линия метеорных вод. В течение характеризуемого срока данные о $\delta^{18}O$ и $\delta^{2}H$ в атмосферных осадках получены за все месяцы, кроме ноября 2022 г. При сравнении полученного распределения соотношения $\delta^{18}O$ и $\delta^{2}H$ в отобранных пробах относительно глобальной линии метеорных вод (ГЛМВ) выявлено, что проба за ноябрь 2021 г. имеет существенное отклонение вправо, далеко выходящее за буфер в 1‰ по $\delta^{18}O$. Скорее всего, это связано с испарением во время отбора или хранения пробы. Данная проба была исключена из анализа. Таким образом, пригодными для дальнейшей работы признаны 47 месячных проб атмосферных осадков. Линия метеорных вод для полученной совокупности характеризуется уравнением $\delta^{2}H = 7\delta^{18}O + 3,3$ ($R^2 = 0,96$) (рисунок 3). Средневзвешенные по количеству осадков многолетние значения составили: $\delta^{18}O = –7,40$ ‰ и $\delta^{2}H = –47,83$ ‰.

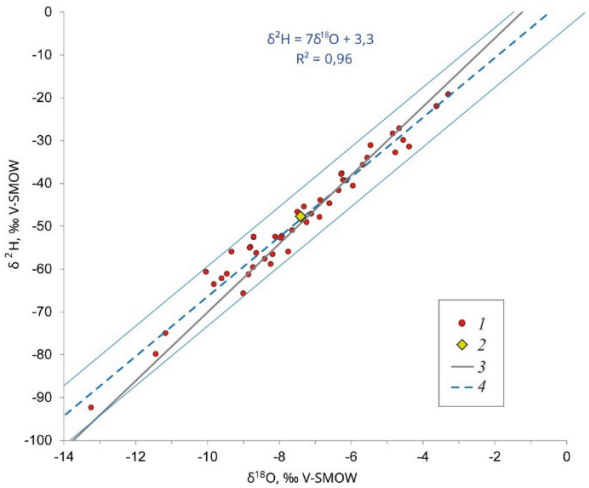


Рисунок 3. Соотношения $\delta^{18}O$ и $\delta^{2}H$ в отобранных пробах атмосферных осадков в сравнении с глобальной линией метеорных вод: 1 – измеренные $\delta^{18}O$ и $\delta^{2}H$ в пробах осадков; 2 – средневзвешенное значение $\delta^{18}O$ и $\delta^{2}H$ по выборке; 3 – глобальная линия метеорных вод (GMWL) согласно [31]; 4 – локальная линия метеорных вод для изучаемого района (тонкими синими линиями показан интервал ±1 ‰ $\delta^{18}O$, соответствующий характерной вариабельности анализов атмосферных осадков)

Figure 3. $\delta^{18}O$ and $\delta^{2}H$ ratios in the collected precipitation samples compared to the global meteoric water line: 1 – measured $\delta^{18}O$ and $\delta^{2}H$ in the precipitation samples; 2 – weighted average $\delta^{18}O$ and $\delta^{2}H$ for the sample; 3 – global meteoric water line (GMWL) according to [31]; 4 – local meteoric water line for the study area (the thin blue lines show the ±1 ‰ $\delta^{18}O$ interval corresponding to the characteristic variability of precipitation analyses)

Динамика изотопного состава атмосферных осадков. На рисунке 2б показана динамика изменения $\delta^{18}O$ и $\delta^{2}H$ в месячных суммах атмосферных осадков за срок мониторинга. Как видно, изменение изотопного состава осадков имеет некоторую связь с сезонами года.

Следует отметить, что все изотопные характеристики весьма контрастно различаются по периодам лет (таблица 1). Так, в теплые периоды во всех случаях средние $\delta^{18}O$ выше –7,4 ‰, а в холодные – ниже –8,5 ‰. Аналогичная картина наблюдается и для $\delta^{2}H$: в теплые периоды диапазон его средних значений составляет от –38,9 ‰ до –49,9 ‰, а в холодные – от –55,6 ‰ до –65,0 ‰. Показатель избытка дейтерия напротив имеет меньшие значения в теплые периоды (8,8–10,8) и более высокие в холодные сезоны (12,2–15,7).

Таблица 1. Средние значения $\delta^{18}O$, $\delta^{2}H$ и избытка дейтерия со стандартными отклонениями по холодному (ноябрь-март) и теплому (апрель-октябрь) периодам лет (все изотопные характеристики даны в ‰ V-SMOW)

Table 1. Mean $\delta^{18}O$, $\delta^{2}H$ and deuterium excess with standard deviation for the cold (November-March) and warm (April-October) periods of the years (all isotopic characteristics given in ‰ V-SMOW)

Год	Теплый период			Холодный период		
	$\delta^{18}O$	$\delta^{2}H$	Избыток D	$\delta^{18}O$	$\delta^{2}H$	Избыток D
2020	-6,14 ± 0,83	-38,9 ± 4,9	10,2 ± 3,0	-9,08 ± 0,46	-57,0 ± 4,3	15,7 ± 2,1
2021	-6,32 ± 1,46	-41,7 ± 10,5	9,0 ± 2,9	-9,73 ± 1,27	-62,6 ± 9,3	15,2 ± 3,0
2022	-7,37 ± 1,39	-49,8 ± 11,0	9,2 ± 1,6	-9,67 ± 2,57	-65,0 ± 19,1	13,4 ± 2,2
2023	-6,41 ± 1,92	-42,4 ± 15,2	8,9 ± 2,4	-8,59 ± 1,83	-56,5 ± 13,5	12,2 ± 4,1
2024	-5,35 ± 2,02	-32,0 ± 13,1	10,8 ± 3,4	-8,64 ± 0,81	-55,7 ± 0,5	13,8 ± 6,63
Среднее	-6,32 ± 0,72	-41,0 ± 6,4	9,6 ± 0,8	-9,14 ± 0,54	-59,4 ± 4,2	14,1 ± 1,4

При помесячном осреднении полученных изотопных характеристик также хорошо прослеживается сезонная изменчивость. Например, осредненные значения $\delta^{18}O$ по месяцам холодного периода года близки к –9 ‰, в то время, как для месяцев теплого периода средние значения $\delta^{18}O$>–7 ‰ (рисунок 4). Наибольший размах $\delta^{18}O$ (разница между минимальным и максимальным значением) характерен для марта и апреля: около 6 ‰.

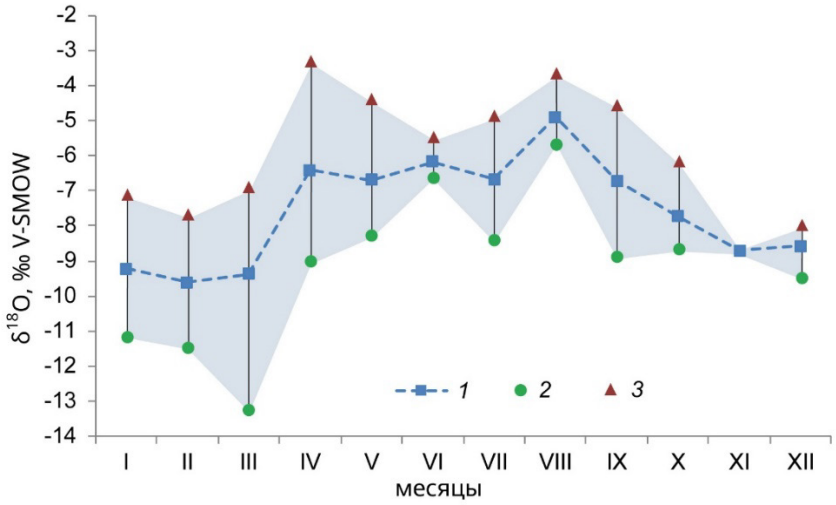


Рисунок 4. Распределение средних (1), минимальных (2), максимальных (3) значений $\delta^{18}O$ в пробах атмосферных осадков по месяцам года за период опробования.

Figure 4. Distribution of mean (1), minimum (2), maximum (3) $\delta^{18}O$ values in atmospheric precipitation samples by month of the year for the sampling period.

Корреляционный анализ. Корреляционный анализ проводился с целью установления связи с факторами, которые могут влиять на изотопные характеристики атмосферных осадков в течение года. К таким факторам можно отнести T и RH воздуха, количество осадков и интенсивность их выпадения. Последний показатель определялся как отношение суммы осадков за месяц к числу дней с осадками. Вычисленные линейные коэффициенты корреляции Пирсона r и коэффициента ранговой корреляции Спирмена ρ представлены в таблицах 2 и 3. При r >0,8 связь считается очень сильной, при r = 0,6–0,8 – сильной, при r = 0,4–0,6 – умеренной, при r <0,4 – слабой и очень слабой [28]. Вычисленные коэффициенты корреляции сравнивались с критическими значениями, соответствующими уровням значимости α = 0,05 и α = 0,01.

Таблица 2. Коэффициенты корреляции Пирсона r между изотопными ($\delta^{18}O$, $\delta^{2}H$ и избыток дейтерия) и метеорологическими (средние T, сумма осадков P, интенсивность выпадения осадков $P_{инт}$ и абсолютная влажность RH) характеристиками ($P_{инт}$ вычислялась как сумма осадков за месяц, разделенная на число дней с осадками в данном месяце. Жирным шрифтом показаны статистически значимые показатели r выше $r_{крит}$ для α=0,01. n = 47. Для α=0,05 $r_{крит}$ = 0,29; для α=0,01 $r_{крит}$ = 0,37)
Table 2. Pearson correlation coefficients r between isotopic ($\delta^{18}O$, $\delta^{2}H$ and deuterium excess) and meteorological (mean T, total precipitation P, precipitation intensity $P_{инт}$ and RH) characteristics ($P_{инт}$ was calculated as the total monthly precipitation divided by the number of days with precipitation in a month. Statistically significant r values above $r_{крит}$ for α=0.01 are shown in bold. n = 47. For α=0.05 $r_{крит}$ = 0.29; for α=0.01 $r_{крит}$ = 0.37)

Характеристика	**T, °C**	**P, мм**	**$P_{инт}$, мм**	**RH, %**
$\delta^{18}O$	**0,70**	-0,17	0,12	**-0,50**
$\delta^{2}H$	**0,67**	-0,11	0,20	**-0,46**
Избыток D	**-0,46**	0,34	0,26	**0,40**

Таблица 3. Коэффициенты корреляции Спирмена ρ между изотопными ($\delta^{18}O$, $\delta^{2}H$ и избыток дейтерия) и метеорологическими (средние T, сумма осадков P, интенсивность выпадения осадков $P_{инт}$ и RH) характеристиками (жирным шрифтом показаны статистически значимые показатели ρ выше $\rho_{крит}$ (α=0,01). n = 47)
Table 3. Spearman correlation coefficients ρ between isotopic ($\delta^{18}O$, $\delta^{2}H$ and excess deuterium) and meteorological (mean T, precipitation total P, precipitation intensity $P_{инт}$ and RH) characteristics (statistically significant ρ values above $\rho_{крит}$ (α=0.01) are shown in bold. n = 47)

Характеристика	**T, °C**	**P, мм**	**$P_{инт}$, мм**	**RH, %**
$\delta^{18}O$	**0,72**	-0,23	-0,02	**-0,54**
$\delta^{2}H$	**0,68**	-0,12	0,14	**-0,50**
Избыток D	**-0,45**	**0,44**	**0,43**	0,36

Как видно из вычисленных коэффициентов корреляции, $\delta^{18}O$ и $\delta^{2}H$ в атмосферных осадках демонстрируют сильную прямую связь с режимом температуры воздуха, а также умеренную обратную связь с относительной влажностью воздуха. Последняя, так же, как и температура воздуха, имеет хорошо выраженную сезонность. Между температурой и относительной влажностью воздуха существует сильная обратная связь: коэффициент корреляции Пирсона за срок мониторинга составил r = –0,75. Из графиков на рисунке 2а видно, что на относительную влажность воздуха в отдельные периоды оказывает влияние и количество осадков, однако связь между этими показателями неустойчивая (r = 0,24). Отметим также, что значения $\delta^{18}O$ и $\delta^{2}H$ в осадках не демонстрируют значимой связи с их количеством и интенсивностью.

Показатель избытка дейтерия по полученным коэффициентам корреляции Пирсона имеет умеренную связь с температурой (обратная) и относительной влажностью воздуха (прямая). Кроме того, вычисленные коэффициенты корреляции Спирмена показывают значимую прямую связь избытка дейтерия с количеством и интенсивностью осадков. Также отметим, что значения $\delta^{18}O$ и избытка дейтерия умеренно коррелируют друг с другом ($r = –0,59$).

На более коротких промежутках времени корреляционные зависимости между изотопными и метеорологическими характеристиками демонстрируют сильную неустойчивость. На рисунке 5 представлены результаты расчета коэффициента корреляции Пирсона для пар «$\delta^{18}O$ – T», «$\delta^{18}O$ – RH», «избыток D – T», «избыток D – RH», полученные методом «скользящего окна» для 6-месячных периодов. Можно увидеть, что даже между такими хорошо коррелируемыми показателями как $\delta^{18}O$ и температура воздуха в отдельные периоды связь теряет статистическую значимость (конец 2022 г. – начало 2023 г.), а иногда и меняет знак с прямого на обратный (середина 2021 г.). Корреляция между $\delta^{18}O$ и RH также меняется с устойчивой отрицательной на положительную и обратно. При этом динамика коэффициентов корреляции в парах «$\delta^{18}O$ – T» и «$\delta^{18}O$ – RH» характеризуется некоторой симметричностью в противофазе друг к другу. Похожая картина наблюдается и в парах «избыток D – T» и «избыток D – RH».

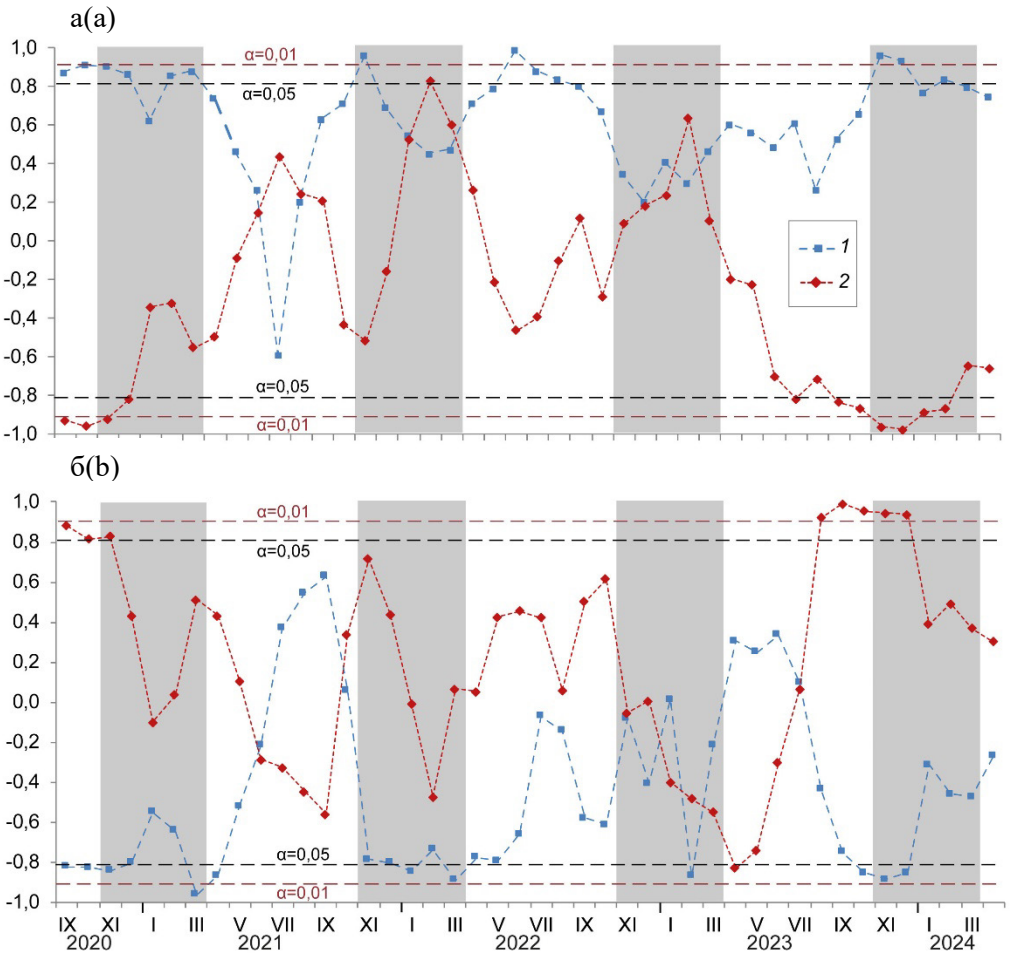


Рисунок 5. Изменение коэффициента корреляции Пирсона *r*, полученного «скользящим окном» по 6-месячным периодам, для следующих характеристик: а – $\delta^{18}O$ – T (1) и RH (2); б – избыток дейтерия – T (1) и RH (2). Серым фоном показаны холодные периоды (ноябрь – март).

Figure 5. Variations in the Pearson correlation coefficient *r*, obtained using a sliding window over 6-month periods, for the following characteristics: a – $\delta^{18}O$ – T (1) and RH (2); b – deuterium excess – T (1) and RH (2). Cold periods (November – March) are shown in gray.

Источники атмосферной влаги. Для месяцев, характеризующихся минимальными и максимальными значениями $\delta^{18}O$ и $\delta^{2}H$, были построены обратные траектории движения воздушных масс (рисунок 6).

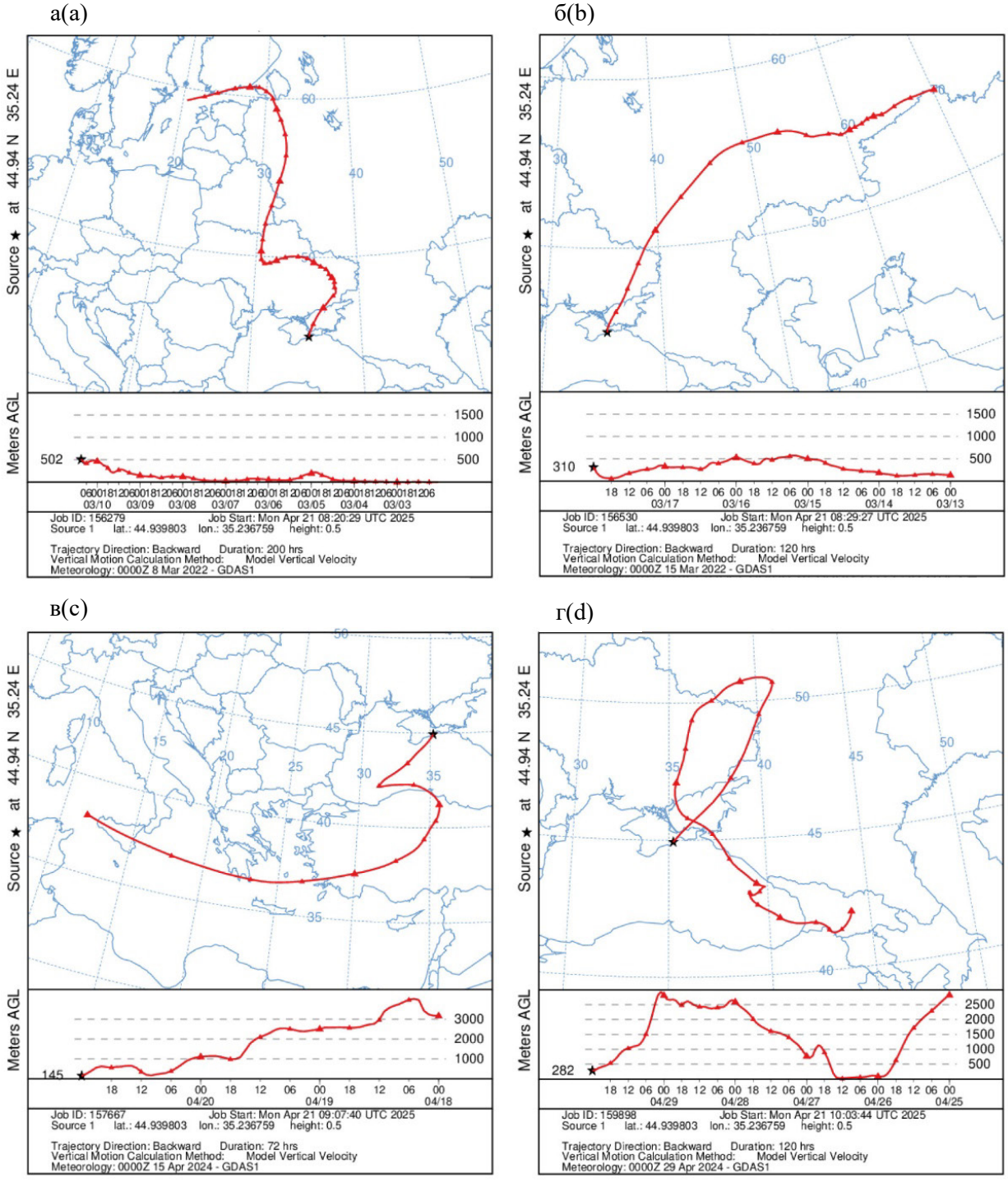


Рисунок 6. Обратные траектории движения воздушных масс, принесших атмосферные осадки: а – 10 марта 2022 г.; б – 18 марта 2022 г; в – 21 апреля 2024 г.; г – 30 апреля 2024 г. Траектории рассчитаны с помощью модели NOAA HYSPLIT[2].

Figure 6. Backward trajectories of air masses that brought atmospheric precipitation: a – March 10, 2022; b – March 18, 2022; c – April 21, 2024; d – April 30, 2024. The trajectories were calculated using the NOAA HYSPLIT model[2].

Наиболее «легкий» изотопный состав осадков наблюдался в марте 2022 г. В целом данный месяц характеризовался пониженной температурой воздуха (в среднем 2,4 °С) в сравнении с нормой (4,4 °С). Подавляющий объем месячных осадков выпал в виде снега в ходе двух событий: 10–12 и 17–18 марта. Произведенные обратные траектории показали, что в первом событии источником поступления влаги могли быть территории к северу от Крыма, вплоть до Балтийского моря (рисунок 6а). Во втором событии воздушные массы могли поступать с северо-востока, со стороны Западно-Сибирской равнины (рисунок 6б).

Наиболее «тяжелый» изотопный состав осадков за срок мониторинга отмечен в апреле 2024 г. Количество осадков в этом месяце (6,2 мм) было существенно ниже нормы (24 мм), а средняя температура воздуха (16,6 °С) – существенно выше нормы (9,7 °С). Зафиксировано два события выпадения дождя: 20–21 и 30 апреля. В первом событии воздушные массы пришли со стороны Средиземного моря через Малую Азию и акваторию Черного моря (рисунок 6в). Во втором событии траектория воздушных масс начинается с юго-восточной части акватории Черного моря с заходом на сушу к северо-востоку от Крыма и обратно через акваторию Азовского моря (рисунок 6г).

Обсуждение

Локальная линия метеорных вод. Полученное для изучаемого района уравнение ЛЛМВ $\delta^2H = 7\delta^{18}O + 3{,}3$ ($R^2 = 0{,}96$) (рисунок 3) несколько отличается от такового, полученного для северного склона центральной части Крымских гор ($\delta^2H = 7{,}3\delta^{18}O + 4{,}8$; $R^2 = 0{,}97$; [18]), а также от глобальной линии метеорных вод (ГЛМВ; $\delta^2H = 8\delta^{18}O + 10$ [29]). Некоторое уменьшение углового коэффициента по сравнению с ГЛМВ указывает на эффект вторичного испарения дождевых капель при их движении сквозь сухой воздух. Значение $\delta^2H/\delta^{18}O < 8$ характерно для аридных регионов, где обычно оно составляет 5–6 [30]. Таким образом, эффект вторичного испарения дождевых капель в юго-восточной части Крымского полуострова проявляется несколько сильнее, чем в центральной части, что, очевидно, связано с более засушливым климатом.

Константа *b* в уравнении ЛЛМВ указывает на условия испарения влаги с водной поверхности (источника атмосферной влаги). При быстром испарении в условиях низкой влажности воздуха эта константа имеет тенденцию к увеличению. Так, для Средиземноморского региона по данным [31] она в среднем составляет $b = 22$, а уравнение ЛЛМВ имеет вид $\delta^2H = 8\delta^{18}O + 22$. Это указывает на интенсивный процесс испарения морской воды сухим континентальным воздухом. Установлено, что по мере продвижения влаги со стороны Атлантики вглубь Евроазиатского континента константа *b* на каждые 100 км уменьшается примерно на 0,7 ‰ [1]. Низкое значение данной константы для юго-восточного Крыма может быть следствием данной закономерности, поскольку источники поступающей к нему влаги зачастую достаточно удалены.

Сезонность изотопного состава атмосферных осадков. Предшествующим исследованием [18] выявлено, что изменение изотопного состава атмосферных осадков Крыма в течение года характеризуется сезонностью. Она проявляется в том, что содержание тяжелых изотопов в осадках теплого периода обычно значительно выше, чем в осадках холодного периода. Однако, в отдельные годы отмечается нарушение этого правила. Например, в 2013 г. на массиве Чатырдаг в центральной части Крымских гор выпавшие в теплый период атмосферные осадки в среднем имели более «лёгкий» изотопный состав, чем в холодный период (на 0,5 ‰ для $\delta^{18}O$ и на 3,7 ‰ для δ^2H).

Результаты настоящего исследования также показывают хорошо выраженную сезонность во внутригодовом распределении изотопных характеристик атмосферных осадков в течение всего 4-летнего срока мониторинга. Это относится как к $\delta^{18}O$ и δ^2H, так и к показателю избытка дейтерия. Разница $\delta^{18}O$ между теплым и холодным периодами была довольно стабильной (2,0–3,5‰; таблица 1). При помесячном осреднении $\delta^{18}O$ и δ^2H обособляются месяцы теплого (апрель-октябрь) и холодного (ноябрь-март) периодов (рисунок 4).

Избыток дейтерия в осадках также проявляет выраженную сезонность: в холодные периоды его величина существенно (в среднем на 4,5 ‰) больше, чем в теплые (таблица 1). Аналогичная закономерность выявлена и для центральной части Крымских гор [18].

Контролирующие факторы. Основными факторами, контролирующими изотопный состав атмосферных осадков, являются температура воздуха и количество осадков [32]. Для станций, расположенных в умеренно-континентальных условиях, ведущим фактором обычно является температура. Для станций тропического пояса, где температура воздуха имеет небольшие сезонные различия, на первое место выходит динамика интенсивности атмосферных осадков (количественный эффект). В отдельных случаях отмечается статистически значимая связь изотопных характеристик атмосферных осадков с динамикой относительной влажности воздуха [15]. При отсутствии единого доминирующего источника поступления атмосферной влаги, что характерно для Крыма, обнаруживается некоторая корреляция изотопного состава осадков с долей отдельных источников [18].

Выявленная неустойчивость корреляционных связей между метеорологическими параметрами и изотопным составом атмосферных осадков на коротких временных отрезках (рисунок 5), очевидно, связана с сильными колебаниями изотопных характеристик осадков в отдельные периоды. Причина этому видится в быстрой смене источников поступления влаги. Это наиболее характерно для весенних (март, апрель) и осенних (сентябрь) месяцев, когда в Крыму происходит перестройка процессов атмосферной циркуляции с резкой сменой направления движения воздушных масс (рисунок 6). Можно предположить, что этим обусловлена высокая вариация изотопного состава атмосферных осадков, отмечаемая в эти месяцы (рисунок 4), в том числе, минимумы и максимумы значений $\delta^{18}O$ и $\delta^{2}H$.

Изменчивость корреляционной связи между метеорологическими и изотопными характеристиками осадков (рисунок 5) показывает, что температурный эффект объясняет около 30 % данных (при уровне значимости $\alpha = 0,05$). Большинство из них приходится на холодные периоды года (за исключением 2022 г.). Влиянием относительной влажности воздуха объясняется около 20 % проб осадков. Следует отметить, что интерпретация зависимости изотопного состава от температуры и влажности осложнена их мультиколлинеарностью, затрудняющей выделение вклада каждого параметра.

Таким образом, ведущим фактором, определяющим внутригодовую динамику изотопного состава атмосферных осадков, является режим температуры воздуха. Вторым по значимости контролирующим фактором, как и в других районах Крыма [18], очевидно, является смена источников атмосферной влаги, формирующей осадки.

Наиболее полно связь между изотопным составом атмосферных осадков и температурой воздуха выражается логарифмической функцией. На примере $\delta^{18}O$ она описывается уравнением $\delta^{18}O = 1,95\ln(T) - 12,2$ (R^2=0,52) (рисунок 7). Установленная связь может применяться при палеоклиматических исследованиях в юго-восточной части Крыма, выполняемых на основе изотопных анализов карбонатных отложений (например, спелеотем карстовых полостей).

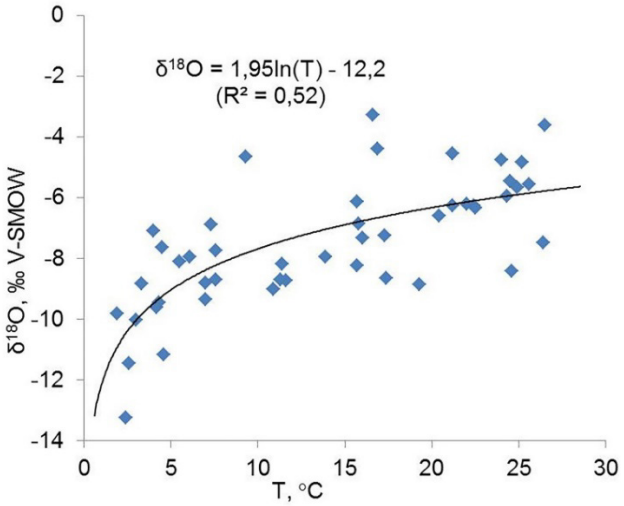


Рисунок 7. Аппроксимация связи между $\delta^{18}O$ атмосферных осадков юго-восточного Крыма и температурой воздуха посредством логарифмической функции.

Figure 7. Approximation of the relationship between $\delta^{18}O$ of atmospheric precipitation in southeastern Crimea and air temperature using a logarithmic function.

Заключение

Мониторинг изотопного состава ($\delta^{18}O$ и $\delta^{2}H$) атмосферных осадков проводился на территории Карадагского природного заповедника в течение 4-х лет (с июня 2020 г. по июнь 2024 г.) по методике GNIP. Наблюдавшиеся в течение срока мониторинга вариации показателей температурно-влажностного режима позволяют считать полученную выборку проб атмосферных осадков представительной для данного района.

Построенная по результатам мониторинга локальная линия метеорных вод (ЛЛМВ) описывается уравнением $\delta^{2}H = 7\delta^{18}O + 3{,}3$ ($R^2 = 0{,}96$), которое несколько отличается от полученной ранее ЛЛМВ для центральной части Крымского полуострова. Последнее объясняется значительным дефицитом увлажнения изучаемого района.

Внутригодовая динамика изотопных характеристик атмосферных осадков имеет четкую сезонность. Осадки холодного периода (ноябрь–март) характеризуются пониженными $\delta^{18}O$ и $\delta^{2}H$ и повышенным показателем избытка дейтерия, по сравнению с осадками теплого периода (апрель–октябрь). Наибольшие вариации изотопного состава характерны для осадков весенних месяцев, что может быть объяснено перестройкой атмосферно-циркуляционных процессов в это время.

Корреляционный анализ выявил сильную прямую связь изотопных характеристик атмосферных осадков с температурой воздуха и умеренную обратную связь с относительной влажностью воздуха. Статистически значимая связь изотопных характеристик с количеством осадков отсутствует, однако показатель избытка дейтерия демонстрирует умеренную прямую корреляцию с количеством и интенсивностью осадков.

Для отдельных месяцев, характеризовавшихся экстремальными характеристиками изотопного состава, построены обратные траектории движения воздушных масс, принесших влагу. Было обнаружено, что изотопно-легкие атмосферные осадки вызваны поступлением воздушных масс с северной и центральной частей континента, а изотопно-тяжелые осадки поставляются со стороны Средиземного и Черного морей. Таким образом, в определенные месяцы, источники влаги становятся ведущим фактором, определяющим изотопный состав атмосферных осадков.

Полученные результаты предоставляют базовую информацию для дальнейших региональных гидрологических, гидрологических, климатических исследований с использованием метода стабильных изотопов воды.

Благодарности

В.А. Лапченко принимал участие в исследовании в рамках выполнения темы государственного задания № 124030100098 – 0. Авторы выражают благодарность инженерам Карадагской станции фонового экологического мониторинга Давидовичу Д. Н., Родионову А. Н., Столярову Л. А., Медведеву В. Г. за помощь в опробовании атмосферных осадков.

Acknowledgements

V.A. Lapchenko took part in the study within the framework of the state assignment № 124030100098 – 0. The authors thank the engineers of the Karadag environmental monitoring station Davidovich D. N., Rodionov A. N., Stolyarov L. A., Medvedev V. G. for their assistance in sampling atmospheric precipitation.

Литература / References

1. Ферронский В.И., Поляков В.А. Изотопия гидросферы Земли. М.: Научный мир, 2009. 632 с. Ferronsky V.I., Polyakov V.A. Isotopy of the Earth hydrosphere. M.: Scientific World, 2009. 632 p. (In Russian; abstract in English).
2. Chen L., Wang Q., Zhu G., Lin X., Qiu D., Jiao Y., Lu S., Li R., Meng G., Wang Y. Dataset of stable isotopes of precipitation in the Eurasian continent. Earth Syst. Sci. Data. 2024, vol. 16, pp. 1543–1557. DOI: 10.5194/essd-16-1543-2024.

3. Saidaliyeva Z., Shahgedanova M., Yapiyev V., Wade A.J., Akbarov F., Esenaman uulu M., Kalashnikova O., Kapitsa V., Kasatkin N., Rakhimov I., Satylkanov R., Sayakbaev D., Semakova E., Severskiy I., Petrov M., Umirzakov G., Usubaliev R. Precipitation in the mountains of Central Asia: isotopic composition and source regions. Atmos. Chem. Phys. 2024, vol. 24, pp. 12203–12224. DOI: 10.5194/acp-24-12203-2024.

4. Васильчук Ю.К., Буданцева Н.А. Изменчивость изотопно-кислородного состава реки Яузы в пределах города Москвы в 2019-2021 гг. под влиянием снеготаяния и сильных дождей // Водные ресурсы. 2024. Т.51. № 2. С. 170–178. DOI: 10.31857/S0321059624020033.
Vasil'chuk Yu.K., Budantseva N.A. Variations of the oxygen isotopic composition of the Yauza river within the city of Moscow in 2019–2021 under the effect of snow melting and heavy rains. Water Resources. 2024, vol. 51, no. 2, pp. 127-134. DOI: 10.1134/S0097807823700689.

5. Папина Т.С., Эйрих А.Н., Эйрих С.С. Использование характеристик изотопного состава воды для оценки вклада зимних и летних атмосферных осадков в сток Верхней Оби в период открытого русла // Водные ресурсы. 2024. Т. 51. № 4. С. 445–455. DOI: 10.31857/S0321059624040062.
Papina T.S., Eirikh A.N., Eirikh S.S. The use of the characteristics of water isotopic composition for assessing the contribution of winter and summer precipitation to the Upper Ob runoff during the open-water period. Water Resources. 2024, vol. 51., no. 4, pp. 418-427. DOI: 10.1134/S0097807824700866.

6. Токарев И.В., Амеличев Г.Н. Оценка испарения по данным об изотопном составе воды (2H, 18O) // Учёные записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология. 2020. Том 6 (72). № 2. С. 294–319.
Tokarev I.V., Amelichev G.N. The evaluation of evaporation by use of data on the isotopic composition of water (2H, 18O). Scientific Notes of the V. I. Vernadsky Crimean Federal University. Geography. Geology. 2020, vol. 6 (72), no. 2, pp. 294–319. (In Russian; abstract in English).

7. Gázquez F., Quindós L., Rábago D., Fuente I., Celaya S., Sainz C. The role of cave ventilation in the triple oxygen and hydrogen isotope composition of condensation waters in Altamira Cave, northern Spain // Journal of Hydrology. 2022. V. 606. 127416. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.127416.

8. Bernal-Wormull J.L., Moreno A., Bartolomé M., Arriolabengoa M., Pérez-Mejías C., Iriarte E., Osácar C., Spötl C., Stoll H., Cacho I., Edwards R.L., Cheng H. New insights into the climate of northern Iberia during the Younger Dryas and Holocene: The Mendukilo multi-speleothem record // Quaternary Science Reviews. 2023. V. 305. 108006. DOI: 10.1016/j.quascirev.2023.108006.

9. Chizhova J.N., Mikhalenko V.N., Kutuzov S.S., Lavrentiev I.I., Lipenkov V.Ya., Kozachek A.V. Causes of Uncertainties in Paleoclimatic Reconstructions Based on the Oxygen Isotope Composition of Glacier Ice on Elbrus (Western Plateau) // Izv. Atmos. Ocean. Phys. 2024. V. 60 (Suppl 2). P. S214–S226. DOI: 10.1134/S0001433824701202.

10. Амеличев Г.Н., Токарев И.В., Токарев С.В., Крайнюкова И.А., Бурлакова Н.С. Комплексная оценка возраста и установление условий формирования минеральных вод «Бишули» (Равнинный Крым) на основе изотопно-геохимических данных // Учёные записки Крымского Федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология. Т. 3 (69). № 2. 2017. С. 130–150.
Amelichev G.N., Tokarev I.V., Tokarev S.V., Kraynyukova I.A., Burlakova N.S. The "Bishuli" mineral waters (the Crimean Plains): comprehensive evaluation of its age and conditions of formation on the base of isotope-geochemical data. Scientific Notes of the V. I. Vernadsky Crimean Federal University. Geography. Geology. 2017, vol. 3 (69), no. 2, pp. 130–150. (In Russian; abstract in English).

11. Казанцева А.С., Кадебская О.И., Дублянский Ю.В., Катаев В.Н. О формировании химического и изотопного состава подземных вод иренского горизонта (на примере Кунгурской ледяной пещеры) // Вестник Пермского Университета. Геология. 2022. Т. 21. № 4. С. 326–340. DOI: 10.17072/psu.geol.21.4.326.

Kazantseva A.S, Kadebskaya O.I., Dublyansky Y.V., Kataev V.N. On the formation of the chemical and isotopic composition of groundwater of the irenskiy aquifer (on the example of the Kungur ice cave). Bulletin of Perm University. Geology. 2022, vol. 21, no. 4, pp. 326–340. (In Russian; abstract in English).

12. Токарев И.В., Исаков В.А., Исакова Т.Н. Использование изотопных методов для оценки условий формирования ресурсов и запасов подземных вод // Разведка и охрана недр. 2024. № 1. С. 74–82. DOI: 10.53085/0034-026X_2024_1_74.
Tokarev I.V., Isakov V.A., Isakova T.N. Use of isotope methods for estimating resources and pastures of underground water deposits. Razvedka i ohrana nedr. 2024, no. 1, pp. 74–82. (In Russian; abstract in English).
13. Ермакова Г.С., Горелиц О.В., Жбаков К.К., Землянов И.В., Милютина И.Ю. Экстремальные паводки на реках Крыма в 2021 году // Водные ресурсы. 2022. Т. 49. № 4. С. 460–473. DOI: 10.31857/S0321059622040046.
Ermakova G.S., Gorelits O.V., Zhbakov K.K., Zemlyanov I.V., Milyutina I.Yu. Extreme floods in Crimean rivers in 2021. Water Resources. 2022, vol. 49, no. 4, pp. 616-629. DOI: 10.1134/S0097807822040042.
14. Лубков А.С., Вышкваркова Е.В., Воскресенская Е.Н., Щодро А.Е. К вопросу о прогнозировании катастрофических паводков на территории Крыма // Водные ресурсы. 2024. Т. 51. № 6. С. 831–840. DOI: 10.31857/S0321059624060092.
Lubkov A.S., Vyshkvarkova E.V., Voskresenskaya E.N., Shchodro A.E. Forecasting catastrophic floods in Crimean territory. Water Resources. 2024, vol. 51, no 6, pp. 960–967. DOI: 10.1134/S0097807824701197.
15. Giménez R., Bartolomé M., Gázquez F., Iglesias M., Moreno A. Underlying Climate Controls in Triple Oxygen (16O, 17O, 18O) and Hydrogen (1H, 2H) Isotopes Composition of Rainfall (Central Pyrenees) // Front. Earth Sci. 2021. V. 9. 633698. DOI: 10.3389/feart.2021.633698.
16. Shi Y., Jin Z., Wu A., Li G., Li F. Stable isotopic characteristics of precipitation related to the environmental controlling factors in Ningbo, East China // Environmental Science and Pollution Research. 2021. V. 28. P. 10696–10706. DOI: 10.1007/s11356-020-11332-8.
17. Селецкий Ю.Б., Приблуда В.Д., Поляков В.А., Исаев Н.В., Якубовский А.В. Использование концентраций тяжелого изотопа кислорода при изучении подземных вод закарстованных карбонатных массивов Горного Крыма // Водные ресурсы. 1982. Вып. 4. С. 83–90.
Seletsky, Y.B., Pribluda, V.D., Poliakov, V.A., Isaev, N.V., Yakubovsky, A.V. Using concentrations of heavy isotope of oxygen in studies of ground waters in karstified carbonate massifs of the Crimean Mountains. Water Resources. 1982, iss. 4, pp. 83–90. (In Russian; abstract in English).
18. Dublyansky Y.V., Klimchouk A.B., Tokarev S.V., Amelichev G.N., Langhamer L., Spötl C. Stable isotopic composition of atmospheric precipitation on the Crimean Peninsula and its controlling factors // Journal of Hydrology. 2018. V. 565. P. 61–73. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.08.006.
19. Ведь И.П. Климатический атлас Крыма / Приложение к научно-практическому дискуссионному аналитическому сборнику «Вопросы развития Крыма». Симферополь: Таврия-Плюс, 2000. 120 с.
20. Золоторева А.П., Осокина И.А., Хусид С.В. Особенности циркуляционных процессов и характеристика ветра при выпадении осадков в зимний и переходные периоды в Крыму // Труды УкрНИГМИ. 1991. Вып. 242. С. 56–59.
21. Климат и опасные гидрометеорологические явления Крыма / Под. ред. К.Т. Логвиновой, М.Б. Барабаш. Л.: Гидрометеоиздат, 1982. 315 с.
22. Ведь И.П. Климат и облесение крымских нагорий. Симферополь: ТНУ, 2007. 136 с.

23. Langhamer L., Dublyansky Y., Schneider C. Spatial and temporal planetary boundary layer moisture-source variability of Crimean peninsula precipitation // Earth and Space Science. 2021. V. 8. e2021EA001727. DOI: 10.1029/2021EA001727.

24. Костенко Н.С., Кукушкин О.В., Зуев К.А. Климат // Заповедный Карадаг: Очерк-путеводитель / Под общ. ред. А.Л. Морозовой. Симферополь: СОНАТ, 2007. С. 42–51.

25. Костенко Н.С., Кукушкин О.В., Зуев А.В. Климат // Карадаг заповедный: научно-популярные очерки / Под ред. А.Л. Морозовой. Симферополь: Н. Орианда, 2011. С. 29–39.

26. Никифорова М.П., Лапченко В.А. Анализ метеорологических условий на Карадаге в 2014–2018 гг. // Учёные записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология. 2019. Том 5 (71). № 2. С. 293–307.
Nikiforova M.P., Lapchenko V.A. Analysis of meteorological conditions on Karadag in 2014-2018. Scientific Notes of the V. I. Vernadsky Crimean Federal University. Geography. Geology. 2019, vol. 5 (71), no. 2, pp. 293–307. (In Russian; abstract in English).

27. Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation // Tellus. 1964. V. 16. P. 436–468.

28. Evans J.D. Straightforward Statistics for the Behavioral Sciences, Pacific Grove. CA: Brooks/Cole Publishing, 1996.

29. Craig H. Isotopic variations in meteoric waters // Science. 1961. V. 133. P. 1702–1703. DOI: 10.1126/science.133.3465.1702

30. Gat J.R. The isotopes of hydrogen and oxygen in precipitation / Fritz P., Fontes G. eds., Handbook of Environmental Isotope Geochemistry. Vol. 1. Amsterdam: Elsevier, 1980. P. 21–47.

31. Gat J.R., Carmi I. Evolution of the isotopic composition of atmospheric waters in the Mediterranean Sea area. // J. Geophys. Res. 1970. V. 75. P. 3039–3048.

32. Gat J.R., Mook W.G., Meijer H.A.J. Atmospheric water (Volume II) / Mook W.G. ed., Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle: Applications. Paris: UNESCO/IAEA, 2001.

Поступила в редакцию / Received 12.05.2026
Принята к публикации / Accepted 12.08.2026

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Токарев Сергей Викторович, кандидат географических наук, доцент кафедры физической географии и геоморфологии Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского, научный сотрудник Южного филиала Института водных проблем РАН, г. Симферополь, Республика Крым, Россия; SPIN-код: 2531-0505, ORCID: 0000-0001-6088-2621, ResearcherID G-9354-2012, Author ID Scopus: 57203409106; e-mail: tokcrimea@list.ru.

Лапченко Владимир Александрович, научный сотрудник отдела Изучения биоразнообразия и экологического мониторинга, Карадагская научная станция им. Т.И. Вяземского - природный заповедник РАН, филиал ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН», пгт. Курортное, Республика Крым, Россия; SPIN-код: 7551-1174, ORCID: 0000-0002-6441-710X, Scopus Author ID: 46761212200; e-mail: ozon.karadag@gmail.com.

Дублянский Юрий Викторович, доктор геологических наук, главный научный сотрудник Института геологии Инсбрукского университет им. Леопольда Франца, Инсбрук, Австрия; SPIN-код: 5699-8208, ORCID: 0000-0003-1433-9999, Scopus Author ID: 55975505300; e-mail: yuri.dublyansky@uibk.ac.at.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sergey V. Tokarev, Ph. D. (Geography), Associate Professor of the Department of Physical Geography and Geomorphology of V.I. Vernadsky Crimean Federal University, researcher of the Southern Branch of Water Problems Institute RAS, Simferopol, Republic of Crimea, Russia; SPIN-code: 2531-0505, ORCID: 0000-0001-6088-2621, ResearcherID G-9354-2012, Author ID Scopus: 57203409106; e-mail: tokcrimea@list.ru.

Vladimir A. Lapchenko, Researcher of the Department of Biodiversity Studies and Environmental Monitoring, T. I. Vyazemsky Karadag Scientific Station – Nature Reserve of RAS, Branch of A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Kurortnoye, Republic of Crimea, Russia; SPIN-code: 7551-1174, ORCID: 0000-0002-6441-710X, Scopus Author ID: 46761212200; e-mail: ozon.karadag@gmail.com.

Yuri V. Dublyansky, D. Sc. (Geology), Principal Researcher of Institute of Geology, University of Innsbruck, Innsbruck, Austria; SPIN-code: 5699-8208, ORCID: 0000-0003-1433-9999, Scopus Author ID: 55975505300; e-mail: yuri.dublyansky@uibk.ac.at.

ОПАСНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ГИДРОСФЕРЕ: ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ИНЖЕНЕРНЫЕ АСПЕКТЫ
HAZARDOUS PROCESSES IN THE HYDROSPHERE: FUNDAMENTAL AND ENGINEERING ASPECTS

Научная статья / Scientific paper

УДК: 551.578.7

DOI: 10.34753/HS.2026.8.2.163

Оценка интенсивности града на основе регрессионного анализа и нейросетевого моделирования

А. Х. Кагермазов, Л. Т. Созаева

Высокогорный геофизический институт, г. Нальчик, Россия

e-mail: ljk_62@rambler.ru

Аннотация. Опасные конвективные явления, в частности град, наносят значительный экономический ущерб и становятся более частыми и интенсивными, к тому же методы его предсказывания не совершенны. Прогнозирование града, особенно его максимального размера, является сложной задачей, обусловленной дефицитом наблюдательных данных и ограничениями классических методов прогноза. Появление выходной продукции Глобальной модели атмосферы дает новые возможности для совершенствования алгоритмов прогнозирования града. Целью настоящего исследования является оценка максимального размера града по ключевым параметрам атмосферы, рассчитанным по выходной продукции Глобальной модели атмосферы GFS NCEP. Материалом данного исследования послужили фактические данные о датах выпадения и размере града, предоставленные Северо-Кавказской военизированной службой по борьбе с градом за период 2005–2019 гг. В расчет была прията информация о 70 днях с градом. Для исследования привлекались регрессионный анализ и нейросетевое моделирование. Регрессионный анализ позволил выделить основные параметры атмосферы, ответственные за образование града: средний дефицит влажности над уровнем конденсации на 5 км, температура на уровне конвекции, индекс неустойчивости Джорджа, индекс интегральной суммы Миллера, энергетическая характеристика подоблачного слоя. Нормализованный рейтинг значимости предикторов по нейросетевой модели расширил их за счет важного параметра атмосферы − уровня максимальной разности температур в облаке и окружающем воздухе. Получено, что коэффициент детерминации регрессионной модели равен 58 %, а нейросетевой модели 65 %, и по метрике средней абсолютной ошибки нейросетевая модель превосходит регрессионную – 33 % против 48 %. Оба подхода можно применять в системах по борьбе с градом, хотя нейросетевая модель предпочтительна.

Ключевые слова: Глобальная модель атмосферы; аэрологическое зондирование; параметры атмосферы; максимальный размер града; нейросетевое моделирование; прогноз града.

Для цитирования: Кагермазов А. Х., Созаева Л. Т. Оценка интенсивности града на основе регрессионного анализа и нейросетевого моделирования // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2026. Т. 8. Вып. 2. С.163–170. DOI: 10.34753/HS.2026.8.2.163.

Estimation of Hail Intensity Based on Regression Analysis and Neural Network Modeling

Artur Kh. Kagermazov, Lezhinka T. Sozaeva

High-Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Russia

e-mail: ljk_62@rambler.ru

Abstract. Dangerous convective phenomena, particularly hail, cause significant economic damage and are becoming more frequent and intense, while forecasting methods are imperfect. Forecasting hail, especially its maximum size, is a complex task due to the lack of observational data and the limitations of classical forecasting methods. The

availability of output from the Global Atmospheric Model offers new opportunities for improving hail forecasting algorithms. The purpose of this study is to estimate of the maximum hail size based on key atmospheric parameters calculated from the output of the Global Atmospheric model GFS NCEP. Two approaches were used for this: regression analysis and modeling using neural networks. Predictive models were created based on the actual data on hail and atmospheric parameters. Regression analysis made it possible to identify the main atmospheric parameters responsible for the formation of hail: the average humidity deficit above the condensation level at 5 km, the temperature at the convection level, the George instability index, the Miller integral sum index, and the energy characteristic of the under cloudy layer. The normalized predictor significance rating based on the neural network model was expanded with an important parameter of the atmosphere − the level of the maximum temperature difference between the cloud and the surrounding air. It was found that the coefficient of determination of the regression model is 58%, and that of the neural network model is 65 %, and according to the metric of the mean absolute error, the neural network model surpasses the regression model – 33 % versus 48 %. Both approaches can be used in hail suppression systems, although the neural network model is preferable.

Keywords: Global atmospheric model; aerological sounding; atmospheric parameters; maximum hail size; neural network modeling; hail forecast.

For citation: Kagermazov A. Kh., Sozaeva L. T. Estimation of Hail Intensity Based on Regression Analysis and Neural Network Modeling. Hydrosphere. Hazard processes and phenomena, 2026, vol. 8, iss. 2, pp. 163–170. DOI: 10.34753/HS.2026.8.2.163. (In Russian; abstract in English).

Введение

Опасные метеорологические явления, часто возникающие в результате вертикальных перемещений воздуха в атмосфере (конвекции), наносят серьезный экономический ущерб и становятся все более частыми и интенсивными[1] [1–4]. В частности, град вызывает огромные финансовые потери по всему миру и продолжает оставаться одним из самых сложных для прогнозирования метеорологических феноменов [5]. Данные выводы сформированы на основе анализа обзорной статьи [6], содержащей 176 ссылок на исследования из разных регионах мира, посвященной современным методам моделирования и прогнозирования града. По мнению научного сообщества одной из главных проблем метеорологии является возможность точного предсказания града, включая его размер [4, 7, 8].

Основными причинами недостаточной точности прогнозов опасных погодных явлений, включая град, являются недостаток информации о состоянии атмосферы, а также несовершенство существующих методов прогнозирования конвекции [7, 9]. В последнее время возникли новые возможности для использования выходных данных Глобальной модели атмосферы[2] [10–11] вместо фактических метеорологических данных. Обоснование данной замены было проанализировано и рекомендовано в работах авторов настоящей публикации [9, 12].

Известно, что интенсивность града определяется его максимальным размером и кинетической энергией [13]. Целью данного исследования является разработка подходов к оценке максимального размера града: регрессионного анализа и нейросетевой модели; и проведение сравнительного анализа. Для достижения обозначенной цели были сформулированы следующие задачи:

– сбор информации о датах выпадения града и соответствующих им максимальных размеров града;

– расчет набора данных ключевых параметров атмосферы, способствующих развитию конвекции, основанных на прогностической продукции Глобальной модели атмосферы для дней с выпадением града;

– разработка регрессионной и нейросетевой моделей для оценки максимального размера града и их последующее сопоставление.

[1] Climate change is showing its claws: The world is getting hotter, resulting in severe hurricanes, thunderstorms and floods – https://www.munichre.com/en/company/media-relations/media-information-and-corporate-news/media-information/2025/natural-disaster-figures-2024.html. (accessed: 2.08.2025).

[2] National Centers for Environmental Prediction – https://www.emc.ncep.noaa.gov/ (accessed: 4.08.2025).

Материалы и методы исследования

Материалы для настоящего исследования условно можно отнести к трем группам:

− фактические данные о максимальном размере града;

− данные о температуре окружающей среды и температуре точки росы и скорости и направления ветра на стандартных изобарических уровнях, выбранные из Глобальной модели для дней с фактом выпадения града;

− данные о параметрах атмосферы, рассчитанные по известным из физики конвективных явлений соотношениям и информацией, полученной из Глобальной модели атмосферы.

Из многолетних наблюдений известно, что град в радиусе 150 км от метеостанции «Минеральные воды» (область репрезентативности данных аэрологического зондирования) выпадает с мая по август, причем максимальное число градобитий приходится на июнь. Градовые процессы, имеющее место в этом регионе, достигают стадии максимального развития к 14 часам. Это же время является временем выпадения града в большинстве случаев. Большинство процессов происходят в предгорной зоне этого региона, причем 80 % процессов из них являются многоячейковыми и охватывают всю территорию рассматриваемого региона. В рамках научно-исследовательской темы ФГБУ «ВГИ» получает сведения о максимальном размере града, выпадавшего в дни с конвективной активностью. Эти данные предоставляются военизированной службой по борьбе с градом. Сбор информации о градобитиях ведется в пределах 150-километровой зоны, охватываемой аэрологическим зондом метеостанции «Минеральные Воды» и регламентируется документом РД 52.37.746-2010 [3]. Для данного исследования в расчет было принято около 70 событий с известным максимальным размером града, имевших место в градовых сезонах 2020–2021 гг.

По данным Глобальной модели атмосферы для каждой из выбранных дат с градом[1] выбирались температура атмосферного воздуха и точки росы, а также направление и скорость ветра на стандартных изобарических поверхностях по географическим координатам метеостанции «Минеральные Воды». Надежность модельных данных была подтверждена путем их сравнительного анализа с фактическими измерениями на этой метеостанции [12].

Полученные данные позволили вычислить широкий спектр параметров (приблизительно 45), которые известны из существующих методов предсказания опасных метеорологических явлений, влияющих на вероятность возникновения и развития градовых процессов. С целью упрощения вычислительных процедур, связанных с конвективными градовыми процессами, был осуществлен отбор наиболее информативных параметров. В этом процессе применялся бисериальный коэффициент корреляции, что позволило уменьшить количество учитываемых атмосферных параметров до следующих [9, 14]:

− наибольшая разность температур в облаке и окружающем воздухе, DTM;

− уровень, на котором разность температур в облаке и окружающем воздухе больше всего, HM;

− вертикальный градиент температуры в слое выше уровня конденсации на 4,0–4,5 км, DTK;

− суммарная удельная влажность в слое Земля – 5 км, SQZ5;

− средний дефицит влажности в слое выше уровня конденсации на 5 км, $TDSR5$;

− уровень конвекции, $PH1$;

− температура на уровне конвекции, $TH1$;

− индекс неустойчивости Джорджа, DJ;

− индекс интегральной суммы Миллера, $TTMI$;

– энергетическая характеристика подоблачного слоя, DS.

Следует подчеркнуть, что между максимальным размером града и параметрами атмосферы существует сложная зависимость, которая может не всегда подчиняться линейным законам. В качестве возможных вариантов для оценки значений максимального размера града по параметрам атмосферы рассматриваются два

[3] РД 52.37.746-2010. Порядок сбора и обработки данных о градобитиях. Нальчик: Прогресс, 2010.

подхода: множественный линейный регрессионный анализ и нейросетевое моделирование.

Множественная линейная регрессия позволяет строить прогнозы, основываясь на предположении о наличии линейной зависимости между максимальным размером града и независимыми переменными (параметрами атмосферы), выявляя наиболее значимые из последних. Сильная корреляция между независимыми переменными усложняет установление их индивидуального воздействия на зависимую переменную, искажает оценку коэффициентов и повышает стандартные ошибки. Прежде чем приступить к регрессионному анализу, необходимо провести предварительную проверку независимых переменных на присутствие мультиколлинеарности. Затем следует построить регрессионную модель и оценить все критерии, характеризующие ее статистическую значимость и практическую применимость.

Отличительной особенностью нейронных сетей является способность обнаруживать скрытые закономерности в сложных системах, которые могут оставаться недоступными для классических линейных методов. Основной компонент нейронной сети являются нейроны, сгруппированные в слои. Каждый нейрон принимает входные данные, преобразует их с помощью весов и функции активации (сигмоидальная или гиперболический тангенс), а затем передает результат на следующий слой. Этот процесс повторяется, пока не будет достигнут выходной слой, который выдает предсказание[4] [15–16].

При использовании этого метода, обычно, набор исходных данных разбивается на обучающую выборку, составляющую 80 % от общего объема, и тестовую выборку, занимающую оставшиеся 20 %. Обучение нейронной сети происходит с помощью алгоритма обратного распространения ошибки, который постепенно настраивает веса с помощью градиентного спуска с целью минимизации разницы между фактическими значениями и значениями, предсказанными ею. Этот процесс позволяет достигать высоких уровней точности в различных задачах. Наиболее распространенный способ оценить, насколько хорошо нейросеть решает задачу прогнозирования, заключается в применении метрик, адаптированных для регрессионных задач.

Известно, что для оценки качества прогноза по различным методам, используется MAPE (средняя абсолютная ошибка в процентах):

$$MAPE = \frac{1}{n}\sum_{1}^{n}\left|\frac{D_f - D_p}{D_f}\right| 100\%, \qquad (1)$$

где n – номер наблюдений;

D_f – фактическое значение максимального размера град;

D_p – прогностическое значение максимального размера град.

Рассматриваемые методы оценки максимального размера града реализованы в среде SPSS[5] [17].

Результаты исследований и их обсуждение

В предыдущих работах авторов была получена регрессионная модель оценки максимального размера града вида [18, 19]:

$$D = -17{,}839 + 0{,}123TDSR5 - 0{,}056TH1 + 0{,}123DJ - 0{,}097TTMI + 0{,}006DSS \qquad (2)$$

Коэффициенты параметров атмосферы в уравнении (1) вносят удельный вклад на значение максимального диаметра града 0,33; -0,62; 0,67; -0,73; 0,54 соответственно. Наибольший вклад на значение диаметра града оказывает индекс интегральной суммы Миллера, который почти в 2 раза больше, чем средний дефицит влажности в слое выше уровня конденсации на 5 км.

[4] Пишем свою нейросеть: пошаговое руководство. – https://proglib.io/p/neural-nets-guide (дата обращения: 1.08.2025).

[5] IBM SPSS Statistics 27. Neural Networks. – https://www.ibm.com/docs/ru/spss-statistics/27.0.0/ (accessed: 4.08.2025).

Для полученной модели коэффициент детерминации оказался равным $R^2 = 0{,}58$ (58 % изменений максимального диаметра града определяется совместным изменением параметров атмосферы). Анализ остатков (отклонений наблюдаемых значений от теоретически ожидаемых) по тесту Дарбина-Уотсона (2,08) показал отсутствие автокорреляции. Значение коэффициента Фишера и уровень его значимости не превышали допустимые пределы. Эти критерии указали на адекватность построенной модели.

Далее выполнена оценка максимального размера града с использованием методов нейросетевого моделирования на тех же данных. В процессе автоматического подбора была разработана нейросетевая модель, основанная на многослойном персептроне. В этом подходе была выбрана структура модели с десятью нейронами на входном слое, четырьмя нейронами на скрытом слое и одним нейроном на выходном слое. Выбор функции активации выпал на гиперболический тангенс.

Для оценки качества нейросетевой модели рассматривают уровень ее ошибок в процессе обучения и точность при работе с тестовыми данными. Ошибки на этапе обучения показывают, насколько хорошо модель выявила закономерности в обучающей выборке. Точность на тестовой выборке показывает, насколько успешно модель может обобщать полученные закономерности на новые (тестовые данные). Модель признается адекватной, если она показывает низкие ошибки как на обучающих, так и на тестовых данных, без значительной розницы между этими показателями.

Согласно сводке модели, относительные ошибки для обучающей и тестовой выборок составили 0,35, что указывает на адекватность разработанной модели.

На рисунке 1 представлены остатки (разности между предсказанными и фактическими значениями размера града) для обучающей выборки, которые распределены случайным образом вокруг нуля, что также подтверждает адекватность модели.

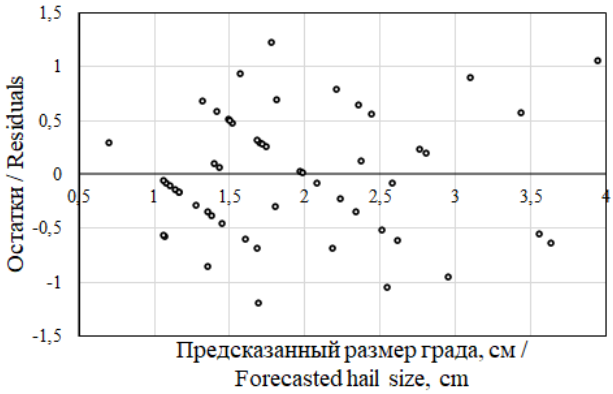


Рисунок 1. Диаграмма ошибок обучающей модели
Figure 1. Error diagram of the training model

Визуализация точности модели на тестовой выборке представлена на рисунке 2. Разброс значений выборки незначителен по длине «усиков», а длина «ящика» свидетельствует о том, что половина выборки сосредоточена вокруг медианы. В целом, визуализация подтверждает, что модель справляется с задачей предсказания на тестовой выборке.

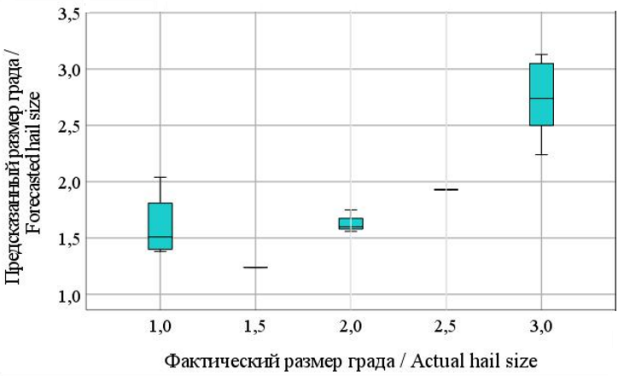


Рисунок 2. Точность модели по тестовой выборке
Figure 2. Accuracy of the model on the test selection

Согласно нейросетевой модели, параметры атмосферы по значимости влияния на максимальный размер града были ранжированы по нормализованной важности в следующем порядке:

– индекс неустойчивости Джорджа (100 %);

– уровень, на котором разность температур в облаке и окружающем воздухе максимальна (97,6 %);

– температура на уровне конвекции (94,5 %);

– средний дефицит влажности в слое выше уровня конденсации на 5 км (92,5 %);

– индекс интегральной суммы Миллера (68 %);

– энергетическая характеристика подоблачного слоя (56 %) и т.д.

По модели регрессии (1) были выделены те же параметры атмосферы за исключением уровня, на котором разность температур в облаке и окружающем воздухе максимальна (HM). В физике образования града в облаках этот параметр играет существенную роль.

В целом, на значение максимального размера града по обеим моделям оказывают наибольшее влияние индекс неустойчивости Джорджа, показывающий количество энергии в атмосфере, способствующий интенсивной конвекции и образованию градовых облаков. Остальные значимые параметры определяют режимы влажности и температуры в зоне формирования града.

Для сравнения результатов оценки максимального размера града, полученных различными методами прогнозирования (нейросетевая модель и регрессионный анализ) с фактическими данными был построен рисунок 3. Визуальный анализ показал положительные результаты: в целом оба метода прогнозирования соответствуют реальным наблюдениям.

Анализ средней абсолютной ошибки прогноза, показал, что нейросетевая модель, имеющая MAPE=33 % значительно превосходит регрессионную модель (MAPE=48 %) в оценке максимального размера града. Это делает нейросетевой подход более предпочтительным для практического применения в оценке риска градобития на основе атмосферных данных.

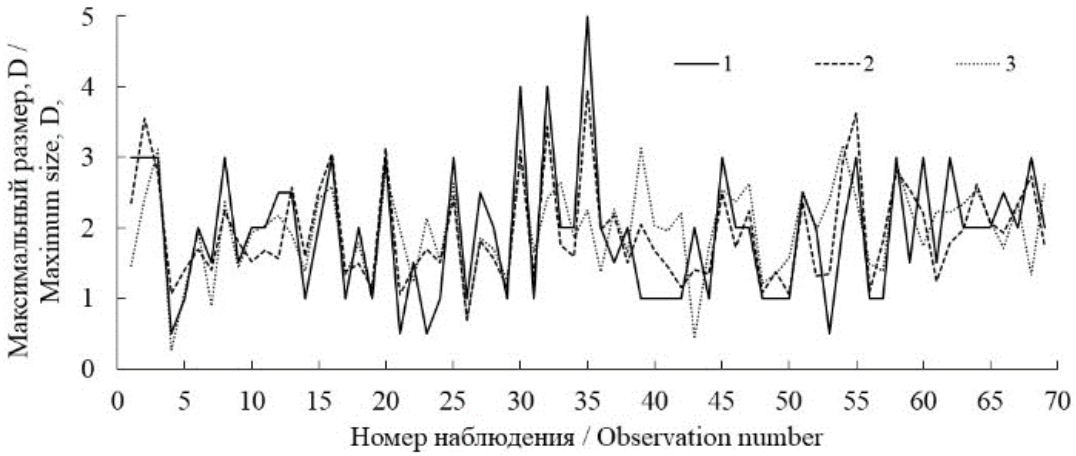


Рисунок. 3. Значения максимального размера града из наблюдений (1), предсказанные по нейросетевой модели (2) и регрессионному анализу (3)

Figure. 3. The values of the maximum hail size from observations (1), predicted by the neural network model (2) and regression analysis (3)

Заключение

Результаты проведенных экспериментов показали, что применение нейронной модели повышает точность предсказаний по сравнению с традиционными статистическими моделями, а накопление данных увеличит преимущество нейросетевой модели. Это открывает новые возможности для дальнейших исследований в сфере метеорологии и прогнозирования града, что может иметь практическое применение в борьбе с градом.

Литература / References

1. Инюхин В.С., Кущев С.А., Суспицина Ю.В. Климатические особенности выпадения града в двух регионах Центрального Кавказа на начало XXI века // Труды ВГИ. 2017. Вып. 100. С. 45–52.
2. Оганесян В.В., Орлова Е.Ф. Оценки рисков нанесения ущербов экономике опасными метеорологическими явлениями погоды // Труды ГМЦ. 2016. № 362. С. 214–223.
3. Шаймарданов В.М. Мониторинг и исследование опасных гидрометеорологических процессов и явлений на территории РФ на основе многофункциональных методов и систем долговременного

хранения их параметров. Дисс. докт. физ.-мат. наук. Обнинск: Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных. 2016. 342 с.
Shaimardanov V.M. Monitoring and research of dangerous hydrometeorological processes and phenomena on the territory of the Russian Federation based on multifunctional methods and systems for long-term storage of their parameters: diss. Dr. Sci. (Phys.-Math.). Obninsk, All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information – World Data Center, 2016. 342 p. (In Russian).

4. Kahraman A., Kendon E.J., Fowler H.J. et al. Future changes in severe hail across Europe, including regional emergence of warm-type thunderstorms. Nature Communications, 2025, vol. 16, Article 8438. DOI: 10.1038/s41467-025-62780-0.
5. Dzombak B. Severe hailstorms are costly and hard to predict. Eos, 2021, No. 102. DOI: 10.1029/2021EO158268.
6. Raupach T.H., Martius O., Allen J.T. et al. The effects of climate change on hailstorms. Nature Reviews Earth & Environment, 2021, no. 2, pp. 213–226. DOI: 10.1038/s43017-020-00133-9.
7. Allen J.T. et al. Understanding hail in the earth system. Reviews of Geophysics, 2020, vol. 58, iss. 1, e2019RG000665. DOI: 10.1029/2019RG000665.
8. Wellmann C., Barrett A., Johnson J., Kunz M. et al. Comparing the impact of environmental conditions and microphysics on the forecast uncertainty of deep convective clouds and hail. Atmospheric Chemistry and Physics, 2020, vol. 20, iss. 4, pp. 2201–2219. DOI: 10.5194/acp-20-2201-2020.
9. Кагермазов А.Х. Цифровая атмосфера. Современные методы и методология исследования опасных метеорологических процессов и явлений. Нальчик: Печатный двор, 2015. 215 с.
10. Dueben P., Wedi N., Saarinen S., Zeman C. Global simulations of the atmosphere at 1.45 km grid-spacing with the integrated forecasting system. Journal of the Meteorological Society of Japan, 2020, vol. 98, iss. 3, pp. 551–572. DOI: 10.2151/jmsj.2020-016.
11. Haiden T., Janousek M., Vitart F., Ferranti L., Prates F. Evaluation of ECMWF forecasts, including the 2019 upgrade. ECMWF Technical Memorandum, 2019, no. 853.
12. Кагермазов А.Х., Созаева Л.Т. Использование глобальной модели атмосферы (GFS NCEP) для прогноза грозоградовых процессов с заблаговременностью до пяти суток // Гидрометеорология и экология. 2021. № 65. С. 671–680.
Kagermazov A.Kh., Sozaeva L.T. Use of output data of the global model of the atmosphere (NCEP GFS) for forecasting thunderstorm processes with lead time of up to five days. Hydrometeorology and Ecology, 2021, no. 65, pp. 671–680.
13. Абшаев А.М., Абшаев М.Т., Барекова М.В., Малкарова А.М. Руководство по организации и проведению противоградовых работ. Нальчик: Печатный двор, 2014. 508 с.
14. Методические указания по прогнозу опасных и особо опасных явлений погоды СК УГМС. Ростов-на-Дону, 1974. 91 с.
15. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс, 2-е издание: Пер. с англ. М.: Вильямс, 2006. 1104 с.
16. Aggarwal C.C. Neural Networks and Deep Learning: A Textbook. Springer, 2023. 541 p.
17. Byuyul A., Tsefel P. SPSS: the Art of Information Processing. Analysis of Statistical Data and Restoration of Hidden Patterns. St. Petersburg: DiaSoftYup Publ., 2005. 608 p.
18. Кагермазов А.Х., Созаева Л.Т. Прогноз града и оценка его размера на основе глобальной математической модели атмосферы // Труды военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2022. Вып. 685. С. 161–168.

Kagermazov A.Kh., Sozaeva L.T. Hail forecast and estimation of its size based on a global mathematical model of the atmosphere. Proceedings of the A.F. Mozhaisky Military Space Academy, 2022, iss. 685, pp. 161–168.

19. Созаева Л.Т., Кагермазов А.Х., Жабоева М.М. Статистические модели оценки максимального размера града // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2022. № 605. С. 149–163.
Sozaeva L.T., Kagermazov A.Kh., Zhaboeva M.M. Statistical models for estimating the maximum size of hail. Proceedings of the Main Geophysical Observatory named after A.I. Voeikov, 2022, no. 605, pp. 149–163.

Поступила в редакцию / Received 10.10.2025
Принята к публикации / Accepted 14.08.2026

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кагермазов Артур Хасанбиевич, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией атмосферных конвективных явлений, Высокогорный геофизический институт, г. Нальчик, Россия; SPIN-код: 8530-6835, ORCID: 0000-0002-8126-6008, Scopus Author ID: 55185153100; e-mail: ka5408@mail.ru.

Созаева Лежинка Танашевна, кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник, Высокогорный геофизический институт, г. Нальчик, Россия; SPIN-код: 1122-0140, ORCID: 0000-0002-9840-3566, Scopus Author ID: 57204527832, Researcher ID: AIC-6568-2022; e-mail: ljk_62@rambler.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Artur Kh. Kagermazov, Ph. D. (Physics and Maths), Head of the laboratory of atmospheric convective phenomena, High-Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Russia; SPIN-code: 8530-6835, ORCID: 0000-0002-8126-6008, Scopus Author ID: 55185153100; e-mail: ka5408@mail.ru.

Lezhinka T. Sozaeva, Ph. D. (Physics and Maths), Associate Professor, Chief Researcher, High-Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Russia; SPIN-code: 1122-0140, ORCID: 0000-0002-9840-3566, Scopus Author ID: 57204527832, Researcher ID: AIC-6568-2022; e-mail: ljk_62@rambler.ru.

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ И ОПАСНОСТИ В ГИДРОСФЕРЕ
ECOLOGICAL PROBLEMS AND HAZARDS IN THE HYDROSPHERE

Научная статья / Scientific paper
УДК: 632.123.1; 528.88
DOI: 10.34753/HS.2026.8.2.171

Геоэкологическая оценка территорий Орловского и Новоорловского ГОКов на основе данных о термических аномалиях

Д. В. Кочев, Л. В. Шумилова, К. В. Свалова, К. В. Насоловец
Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия
e-mail: denis.ko4ev@yandex.ru

Аннотация. Статья посвящена геоэкологической оценке территорий в зоне влияния Орловского и Новоорловского ГОКов (Забайкальский край) на основе анализа термических аномалий по данным продукта MODIS FIRMS за 2000–2025 гг. Объектами исследования являются законсервированное хвостохранилище обогатительной фабрики №1 Орловского ГОКа и действующее хвостохранилище фабрики №2 Новоорловского ГОКа с прилегающими нарушенными землями, рассматриваемые как единая горнопромышленная геосистема. Обработка спутниковых данных выполнена в Google Earth Engine. Установлено, что 92,5 % всех термических событий приходятся на 2001–2015 гг., а 78,7 % зарегистрированы в апреле–мае с максимумом 13–14 апреля 2014 года. Средняя температура аномалий составила 57,3 °C, максимальная – 156,1 °C. Резко выраженный весенний пик указывает на преобладание антропогенных палов сухой растительности, типичных для степных районов Забайкалья. Пространственный анализ выявил три устойчивые зоны концентрации термоточек: к западу от пгт. Новоорловск, в центральной части непосредственно у хвостохранилищ и на востоке в районе техногенного водоема. После 2015 г. частота и площадь термических аномалий резко сократились, и в 2021–2025 гг. зафиксированы лишь единичные события. Сделан вывод о критическом влиянии пирогенного фактора на устойчивость нарушенных земель и эффективность рекультивации: весенние палы уничтожают растительный покров, усиливают ветровую эрозию и вторичное пыление. Рекомендовано включить слой MODIS FIRMS в систему комплексного геоэкологического мониторинга обоих ГОКов, а при проектировании биологической рекультивации и фиторемедиации предусматривать создание противопожарных минерализованных полос в выявленных потенциально опасных зонах. Полученные количественные оценки и карты могут служить основой для актуализации данных о техногенных скоплениях и последующего сопряжения с мультиспектральными снимками Sentinel и Landsat, а также для полевой верификации.

Ключевые слова: хвостохранилище; MODIS FIRMS; термические аномалии; дистанционное зондирование; геоэкологический мониторинг; рекультивация.
Для цитирования: Кочев Д.В., Шумилова Л.В., Свалова К.В., Насоловец К.В. Геоэкологическая оценка территорий Орловского и Новоорловского ГОКов на основе данных о термических аномалиях // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2026. Т. 8. Вып. 2. С.171–186. DOI: 10.34753/HS.2026.8.2.171.

Geoecological Assessment of the Territories of the Orlovsky and Novoorlovsky Mining and Processing Plants Based on Data on Thermal Anomalies

Denis V. Kochev, Lidiya V. Shumilova, Kristina V. Svalova, Konstantin V. Nasolovets
Transbaikal State University, Chita, Russia
e-mail: denis.ko4ev@yandex.ru

Abstract. The article is devoted to the geoecological assessment of the territories in the zone of influence of the Orlovsky and Novoorlovsky mining and processing plants (Zabaykalsky Krai) based on the analysis of thermal anomalies using data from the MODIS FIRMS product for the period 2000–2025. The objects of the study are the

mothballed tailings storage facility of the processing plant No. 1 of the Orlovsky Mining and Processing Plant and the operational tailings storage facility of plant No. 2 of the Novoorlovsky Mining and Processing Plant, along with the adjacent disturbed lands, considered as a single mining and industrial geosystem. Satellite data processing was carried out in Google Earth Engine platform. It was established that 92.5 % of all thermal events occurred between 2001 and 2015, and 78.7 % were recorded in April–May, with a peak on April 13–14, 2014. The average temperature of the anomalies was 57.3 °C, and the maximum was 156.1 °C. The pronounced spring peak indicates the predominance of anthropogenic burning of dry vegetation, typical of the steppe regions of Transbaikalia. Spatial analysis revealed three stable zones of thermal anomaly concentration: to the west of the urban-type settlement of Novoorlovsk, in the central part directly near the tailings dumps, and in the east in the area of the man-made water body. After 2015, the frequency and area of thermal anomalies dropped sharply, and only isolated events were recorded in 2021–2025. It has been concluded that the pyrogenic factor has a critical impact on the stability of disturbed lands and the effectiveness of reclamation: spring fires destroy vegetation cover, exacerbating wind erosion and secondary dusting. It is recommended to include the MODIS FIRMS layer in the system of integrated geo-ecological monitoring of both mining and processing plants, and when designing biological reclamation and phytoremediation, to provide for the creation of fire-resistant mineralized strips in the identified potentially hazardous areas. The obtained quantitative estimates and maps can serve as a basis for updating data on anthropogenic accumulations and subsequently integrating them with multispectral images from Sentinel and Landsat, as well as for field verification.

Keywords: tailings storage; MODIS FIRMS; thermal anomalies; remote sensing; geoecological monitoring; reclamation.

For citation: Kochev D.V., Shumilova L.V., Svalova K.V., Nasolovets K.V. Geoecological Assessment of the Territories of the Oryol and Novoorlovsky GOKs Based on Data on Thermal Anomalies. Hydrosphere. Hazard processes and phenomena, 2026, vol. 8, iss. 2, pp. 171–186. DOI: 10.34753/HS. 2026.8.2.171. (In Russian; abstract in English).

Введение

Хвостохранилище обогатительной фабрики является сложным гидротехническим сооружением, требующим постоянного контроля. Для Новоорловского ГОКа (Забайкальский край) особенно остро стоят проблемы пыления незакрепленных поверхностей и загрязнения прилегающих территорий [1, 2, 3]. Комплексный мониторинг таких объектов должен учитывать не только прямые инженерные риски, но и внешние факторы, способные дестабилизировать их состояние. Космический мониторинг позволяет определить более полную картину состояния гидротехнических сооружений благодаря возможности анализа разнородных и разновременных данных [4, 5].

Одним из таких факторов, часто недооцениваемых, является пирогенный. Повторяющиеся палы сухой растительности уничтожают формирующийся на нарушенных землях почвенно-растительный покров, способствуют усилению ветровой эрозии и резко снижают эффективность биологической рекультивации. Таким образом, оценка пожарно-термического фона территории становится неотъемлемой частью диагностики рисков долговременного хранения отходов.

Спутниковый продукт MODIS FIRMS (Fire Information for Resource Management System) предоставляет уникальную возможность ретроспективного анализа термических аномалий с 2000 г. [6]. Глубина архива имеет принципиальное значение для оценки долгосрочной трансформации территорий, связанных с размещением отходов переработки минерального сырья. Для объектов горнорудной промышленности Забайкалья, формировавшихся и изменявшихся в течение длительного периода, ретроспективные спутниковые данные позволяют рассматривать современное состояние как результат совокупного воздействия природных, техногенных и гипергенных процессов.

В рамках настоящего исследования термические аномалии рассматриваются как дополнительный дистанционный индикатор состояния горнопромышленной геосистемы. Их пространственная повторяемость может отражать участки повышенной пожарной активности, выгорания растительного покрова, сезонного

иссушения поверхности и локальной антропогенной нагрузки. Такие сведения имеют значение для экологизации инженерных решений, поскольку планирование биоремедиации и проектирование восстановительных мероприятий требуют учета внешних факторов, влияющих на устойчивость хвостохранилищ. Особенно важны данные FIRMS для задач комплексного восстановления законсервированных хвостохранилищ: наличие повторяющихся термических аномалий вблизи техногенных объектов может указывать на участки, где условия для формирования устойчивого растительного покрова осложняются воздействием пожаров.

Цель настоящей работы – оценить состояние и риски хвостохранилища Новоорловского ГОКа на основе детального анализа данных MODIS FIRMS, рассматривая термические аномалии как индикатор внешнего дестабилизирующего воздействия и фактор, ограничивающий эффективность рекультивации.

Объект и район исследования

Объект исследования – законсервированное хвостохранилище обогатительной фабрики №1 Орловского ГОКа и эксплуатируемое хвостохранилище обогатительной фабрики №2 Новоорловского ГОКа и прилегающие нарушенные земли, рассматриваемые как геосистема Орловского и Новоорловского горнопромышленного узла.

Район анализа охватывает территорию Орловского и Новоорловского горнопромышленного узла, включающую хвостохранилища, техногенные водоемы, элементы гидрографической сети, населенные пункты Новоорловск и Орловский, транспортные коммуникации, участки открытых нарушенных поверхностей и прилегающие степные ландшафты. Пространственная рамка выбрана так, чтобы рассматривать техногенные объекты не изолированно, а в составе единой системы, где хвостохранилища, водные объекты, селитебные территории и участки нарушенного растительного покрова находятся во взаимосвязи. Включение населенных пунктов и транспортной сети позволяет учитывать антропогенную нагрузку и инфраструктурные факторы, а включение водных объектов – оценивать положение техногенных скоплений относительно потенциальных путей миграции загрязняющих веществ.

Материалы и методы

Для анализа пространственно-временной изменчивости термических аномалий в районе техногенных объектов Орловского ГОКа использован спутниковый продукт MODIS FIRMS, обеспечивающий долговременную регистрацию термически активных пикселей на земной поверхности. Данный продукт выбран как источник ретроспективной информации, позволяющий оценить повторяемость термических аномалий в пределах горнопромышленной геосистемы за длительный период наблюдений. Временной интервал исследования охватывал 2000–2025 гг., что обеспечивает сопоставление современного состояния территории с многолетней динамикой пожарно-термического фона и внешних факторов, потенциально влияющих на состояние техногенных скоплений, хвостохранилищ, нарушенных земель и прилегающих ландшафтов.

Получение данных выполнялось средствами Google Earth Engine [7] с использованием заданной рамки анализа, охватывающей территорию Орловского и Новоорловского горнопромышленного узла. Для снижения вычислительной нагрузки и обеспечения устойчивой выгрузки длительного временного ряда данные извлекались по месячным интервалам. Такой подход позволил сформировать последовательность фрагментов исходной таблицы, содержащих дату регистрации термической аномалии, координаты точки, год, месяц, порядковый номер дня в году, яркостную температуру, показатель достоверности регистрации и служебные атрибуты продукта. После выгрузки месячные таблицы были объединены в единый массив данных за весь период исследования (рисунок 1).

На этапе предварительной обработки выполнена фильтрация точек по границам выбранного участка. Это обеспечило исключение записей, расположенных за пределами территории

анализа, и позволило перейти от общего массива спутниковых регистраций к выборке, непосредственно связанной с районом изучаемых техногенных объектов Орловского и Новоорловского ГОКов. Дополнительно выполнялось приведение полей к единым типам данных, удаление записей с отсутствующими координатами и датами, исключение дублирующихся наблюдений, расчет температуры в градусах Цельсия и присвоение каждой записи временного интервала, соответствующего принятой периодизации исследования.



Рисунок 1. Распределение термоточек по годам по данным MODIS FIRMS
Figure 1. Distribution of thermal points by year according to MODIS FIRMS

Для количественной характеристики динамики термических аномалий рассчитывалась повторяемость регистраций в годовом, месячном и пятилетнем разрезах. Годовая повторяемость использовалась для выявления межгодовой изменчивости пожарно-термического фона и выделения лет с повышенной частотой регистрации термических аномалий. Месячная повторяемость позволяла учитывать сезонную структуру термической активности, связанную с климатическими условиями, состоянием растительного покрова, влажностью поверхности и антропогенной нагрузкой. Пятилетняя агрегация применялась для обобщенной оценки пространственно-временной устойчивости термических аномалий и сопоставления отдельных этапов трансформации территории в пределах длительного периода наблюдений (рисунок 2).



Рисунок 2. Кластеризация точек по пятилетним периодам
Figure 2. Clustering of points by five-year periods

Для обеспечения дальнейшего использования результатов в ГИС-среде сформированы пространственные слои в формате SHP. Отдельно создавались слои точечных регистраций термических аномалий за весь период анализа и за установленные пятилетние интервалы. Все пространственные данные приведены к проекции WGS 84 UTM zone 49N, что обеспечило корректное сопоставление с векторными слоями хвостохранилищ, водных объектов, гидрографической сети, населенных пунктов, дорог, кварталов и других элементов территории. Сформированные SHP-слои предназначены для включения в цифровую основу интерактивной карты горнопромышленных геосистем и последующего сопоставления с материалами дистанционного зондирования Земли, данными БПЛА и результатами полевых обследований.

Для картографического представления результатов использована гексагональная агрегация точечных данных MODIS FIRMS. Применение гексагональной сетки позволило перейти от отдельных точечных регистраций к площадным единицам анализа [8] и тем самым повысить качество пространственной оценки повторяемости термических аномалий. Такой подход снижает визуальную фрагментарность исходных точечных данных, связанную с регулярной структурой спутниковых пикселей, и позволяет выделять зоны устойчивой концентрации регистраций. В пределах каждого гекса рассчитывалось количество термоточек за соответствующий пятилетний период, после чего значения использовались для построения тематических карт повторяемости.

Картографирование выполнялось с использованием единого оформления для всех временных интервалов, что обеспечило сопоставимость результатов между периодами. На карты наносились гексагональные ячейки повторяемости термических аномалий, контекстные слои техногенных и природно-техногенных объектов, граница участка, координатная сетка, населенные пункты и элементы гидрографической сети. Такой способ представления результатов позволяет рассматривать термические аномалии в пространственной связи с хвостохранилищами, техногенными водоемами, нарушенными землями и селитебной инфраструктурой. Полученные таблицы, SHP-слои и карты формируют цифровой информационный блок, который может быть использован при актуализации данных о техногенных объектах, оценке условий биоремедиации и разработке экологически ориентированных инженерных решений в районе Орловского и Новоорловского горнопромышленного узла.

Результаты и их обсуждение

Обработка исходного массива MODIS FIRMS выполнена как последовательный переход от общей таблицы спутниковых регистраций к пространственно ограниченной базе данных термических аномалий, относящихся к району Орловского и Новоорловского горнопромышленного узла. Исходный CSV содержал 1295 записей за период наблюдений 2000–2025 гг. После проверки обязательных атрибутивных полей, приведения дат, координат, яркостной температуры и показателя достоверности к числовым типам данных выполнена фильтрация по текущей рамке анализа. В результате пространственной фильтрации в итоговой таблице осталось 1075 регистраций. Исключенные 220 записей находились за пределами принятой границы участка. Дополнительная проверка на дублирование по сочетанию даты, координат, яркостной температуры и достоверности не изменила размер итоговой выборки, что указывает на отсутствие повторных записей данного типа после пространственного отбора.

Атрибутивная структура итоговой таблицы обеспечивает как временной, так и термический анализ зарегистрированных аномалий. Для каждой записи сохранены дата наблюдения, год, месяц, день года, координаты, яркостная температура в кельвинах, пересчитанное значение температуры в градусах Цельсия, показатель достоверности, служебные атрибуты продукта и пятилетний период. Среднее значение яркостной температуры по итоговой выборке составило 57,28 °C, медианное – 51,05 °C, максимальное – 156,05 °C. Средняя

достоверность регистрации составила 71,39 %, максимальная – достигала 100 %. Основная часть регистраций относится к среднему и высокому уровню достоверности: 57,49 % записей имеют значения от 30 до 79 %, 39,63 % записей имеют значения от 80 до 100 %, доля низкодостоверных регистраций составляет 2,88 %. Такая структура данных позволяет рассматривать полученную выборку как информативную основу для ретроспективной оценки пожарно-термического фона территории.

Годовая динамика показывает выраженную неравномерность термической активности в районе изучаемых техногенных объектов. За весь период анализа термические аномалии зарегистрированы для 18 лет из 26, при этом 2000, 2016, 2018, 2020, 2021, 2022, 2024 и 2025 гг. не содержат регистраций в пределах выбранной рамки. Наибольшее количество термоточек отмечено в 2003 г., когда было зафиксировано 181 событие, что составляет 16,84 % всей итоговой выборки. Далее следуют 2014 г. со 168 регистрациями, 2007 г. со 156 регистрациями, 2004 г. с 85 регистрациями, 2006 г. с 78 регистрациями, 2013 г. с 66 регистрациями и 2019 г. с 62 регистрациями. Эти годы формируют основные пики термической активности и требуют при последующей интерпретации сопоставления с картами растительного покрова, гидрологических условий, открытых нарушенных поверхностей и промышленной инфраструктуры.

Сводка по пятилетним периодам указывает на концентрацию основной части регистраций в первой половине рассматриваемого временного ряда. В период 2001–2005 гг. зафиксировано 350 термоточек, что составляет 32,56 % итоговой выборки. В период 2006–2010 гг. зарегистрировано 328 термоточек, или 30,51 %. В период 2011–2015 гг. отмечено 317 термоточек, или 29,49 %. Таким образом, на первые три пятилетних интервала приходится 92,56 % всех регистраций. После 2015 г. наблюдается резкое снижение частоты термических аномалий: в период 2016–2020 гг. зафиксировано 77 регистраций, что составляет 7,16 %, а в период 2021–2025 гг. только 3 регистрации, что соответствует 0,28 % итоговой выборки. Такая динамика отражает существенное изменение пожарно-термического режима территории в последние десятилетия и может быть использована как дополнительный индикатор трансформации условий функционирования горнопромышленной геосистемы.

Пятилетняя сводка также показывает изменение термических характеристик зарегистрированных аномалий. В 2001–2005 гг. средняя яркостная температура составила 51,21 °C, в 2006–2010 гг. она повысилась до 55,27 °C, а в 2011–2015 гг. достигла 66,44 °C. Максимальное значение зафиксировано именно в период 2011–2015 гг. и составило 156,05 °C . Этот период характеризуется не максимальным количеством регистраций, но наиболее выраженными температурными значениями, что указывает на повышенную интенсивность отдельных термических событий. В 2016–2020 гг. средняя яркостная температура составила 56,74 °C, при этом число регистраций было значительно меньше. В 2021–2025 гг. зарегистрированы единичные события со средней температурой 31,80 °C , что указывает на слабую выраженность термической активности в пределах принятой рамки в последние годы анализируемого периода.

Месячная структура данных демонстрирует ярко выраженную сезонную концентрацию термических аномалий. На апрель приходится 513 регистраций, что составляет 47,7% итоговой выборки. На май приходится 333 регистрации, или 31,0 % В совокупности апрель и май формируют 78,7 % всех зарегистрированных термических аномалий. Март содержит 80 регистраций, июнь 59 регистраций, сентябрь 41 регистрацию, октябрь 23 регистрации, август 15 регистраций и июль 11 регистраций. Такая сезонная структура соответствует весенне-раннелетнему максимуму пожарно-термической активности, который может быть связан с состоянием сухой растительности, низкой влажностью поверхности, открытыми нарушенными участками и антропогенной нагрузкой в окрестностях населенных пунктов и техногенных объектов.

Наиболее выраженные месячные пики отмечены в апреле 2014 г., когда было зафиксировано 165 регистраций, мае 2003 г. с 95

регистрациями, марте 2003 г. с 77 регистрациями, мае 2006 г. с 70 регистрациями, мае 2007 г. с 65 регистрациями, апреле 2007 г. с 62 регистрациями и апреле 2019 г. с 53 регистрациями. Особенно выделяется апрель 2014 г., который одновременно характеризуется высоким числом регистраций, высокой средней яркостной температурой и максимальным температурным значением за весь период наблюдений. Внутри этого месяца наибольшее количество регистраций пришлось на 13 и 14 апреля 2014 г., когда было зафиксировано соответственно 82 и 80 термоточек. Это указывает на кратковременное, но пространственно выраженное событие, которое должно рассматриваться при картографической интерпретации пятилетнего периода 2011–2015 гг.

Полученные годовые, месячные и пятилетние таблицы формируют количественную основу для анализа долговременной трансформации пожарно-термического фона в пределах горнопромышленной геосистемы. Годовая таблица позволяет выделить пики межгодовой активности и периоды снижения числа регистраций. Месячная таблица раскрывает сезонную структуру термических аномалий и показывает доминирование весеннего периода. Пятилетняя сводка обеспечивает обобщение данных на уровне этапов наблюдений, что удобно для сопоставления с картами повторяемости, материалами дистанционного зондирования Земли, данными о состоянии растительности, водных поверхностей, техногенных скоплений и нарушенных земель.

Сохранение обработанной базы данных в виде SHP-слоя в проекции WGS 84 UTM zone 49N обеспечивает возможность включения результатов в ГИС-анализ и интерактивное картографирование. Пространственные слои термических аномалий могут быть сопоставлены с границами хвостохранилищ, техногенными водоемами, гидрографической сетью, селитебными территориями и элементами транспортной инфраструктуры. Такие данные имеют значение для цифровой актуализации сведений о техногенных объектах, оценки состояния прилегающих нарушенных территорий, планирования маршрутов БПЛА, выбора участков полевых обследований и обоснования условий биоремедиации.

Таким образом, результаты обработки MODIS FIRMS показывают, что изучаемая территория характеризовался выраженной, но неравномерной во времени термической активностью. Основная часть зарегистрированных аномалий относится к периоду 2001–2015 гг., после чего наблюдается существенное сокращение числа регистраций. Наиболее активные годы представлены 2003, 2007 и 2014 гг., а сезонный максимум устойчиво связан с апрелем и маем. Для задач проекта эти данные могут рассматриваться как дополнительный дистанционный слой, характеризующий пожарно-термический фон техногенно нарушенной территории, условия трансформации растительного покрова, потенциальные риски для восстановительных мероприятий и пространственный контекст экологизации инженерных решений при работе с техногенным минеральным сырьем.

Анализ карт пространственно-временной повторяемости термических аномалий

Картографический анализ пятилетних периодов показывает, что термические аномалии в районе Орловского и Новоорловского горнопромышленного узла имеют выраженную пространственно-временную неоднородность.

В период 2001–2005 гг. (рисунок 3) термические аномалии распределены по большей части территории анализа, что указывает на высокую пространственную распространенность пожарно-термической активности в ранний этап наблюдений. Наиболее выраженные значения повторяемости отмечены в юго-западной части участка, западнее и юго-западнее Новоорловска, где отдельные гексы достигают 7 регистраций. Дополнительная зона концентрации наблюдается в центральной части карты, восточнее основного хвостохранилища и севернее Орловского, где гексагональные ячейки содержат 5–6 регистраций. Значительная часть территории занята ячейками с низкой и средней повторяемостью, что отражает не локальное единичное событие, а широкое

распространение термических аномалий в пределах природно-техногенного окружения ГОКа. Этот период может рассматриваться как этап наиболее выраженной пространственной вовлеченности прилегающих ландшафтов в пожарно-термический режим.

В период 2006–2010 гг. (рисунок 4) пространственная структура термоточек становится более контрастной. Сохраняется активность западнее и вблизи пгт. Новоорловск, где формируется группа ячеек с повторяемостью до 6 регистраций. Одновременно усиливается восточная зона концентрации в районе техногенного водоема и прилегающих нарушенных участков восточнее пгт. Орловский, где максимальное значение достигает 7 регистраций. Наличие нескольких разобщенных зон повышенной повторяемости указывает на полицентричный характер термической активности. В этот период термические аномалии фиксируются как вблизи селитебной и инфраструктурной части пгт. Новоорловск, так и в районе восточных водных объектов, что важно при сопоставлении пожарно-термического фона с гидрографической сетью, техногенными водоемами и участками возможной миграции загрязняющих веществ.

В период 2011–2015 гг. (рисунок 5) наблюдается изменение пространственного рисунка повторяемости. Наиболее заметная концентрация термических аномалий смещается к центральной части участка, в район основного хвостохранилища и прилегающих к нему территорий. Максимальные значения повторяемости до 6 регистраций фиксируются южнее и юго-восточнее Новоорловского хвостохранилища, а также в центральной части между законсервированным хвостохранилищем и действующим. Дополнительная зона активности отмечена в северо-западной части участка, в пределах верхней части гидрографической сети. По сравнению с предыдущими периодами уменьшается выраженность западной группы около Новоорловска и возрастает значение центральных участков, пространственно связанных с техногенными водоемами и нарушенными поверхностями. Такая конфигурация представляет особый интерес для оценки состояния территорий, прилегающих к хвостохранилищам, поскольку термическая активность в этих зонах может влиять на устойчивость растительного покрова, условия рекультивации и перспективы биоремедиации.

Карта периода 2016–2020 гг. (рисунок 6) демонстрирует резкое сокращение площади активных гексов и снижение общей повторяемости термических аномалий. Большая часть территории анализа представлена пустыми ячейками или единичными регистрациями. Небольшие значения повторяемости сохраняются в юго-западной и центрально-южной частях участка, а также в северо-восточной части карты, где отдельная ячейка достигает 4 регистраций. Пространственная структура этого периода характеризуется фрагментарностью и отсутствием крупных устойчивых зон концентрации. Такое снижение согласуется с количественной сводкой, в которой после 2015 г. отмечено значительное уменьшение числа регистраций. С точки зрения экологической интерпретации данный период может отражать изменение пожарно-термического режима территории, снижение частоты открытых термических событий или изменение условий регистрации, требующее последующего сопоставления с данными о растительности, влажности поверхности, хозяйственной активности и метеорологических условиях.

Период 2021-2025 гг. (рисунок 7) характеризуется минимальной термической активностью. На карте представлены только единичные ячейки с одной регистрацией в западной части участка, вблизи зоны Новоорловска и юго-западного фрагмента рамки анализа. Центральная часть территории, восточный техногенный водоем и район пгт. Орловский практически не содержат зарегистрированных термических аномалий. Такая картина указывает на почти полное отсутствие повторяемой термической активности в пределах принятой рамки в последние годы наблюдений. Этот результат важен как характеристика современного пожарно-термического фона, поскольку он показывает, что на актуальном этапе территория не демонстрирует пространственно устойчивых зон термической повторяемости по данным MODIS FIRMS.

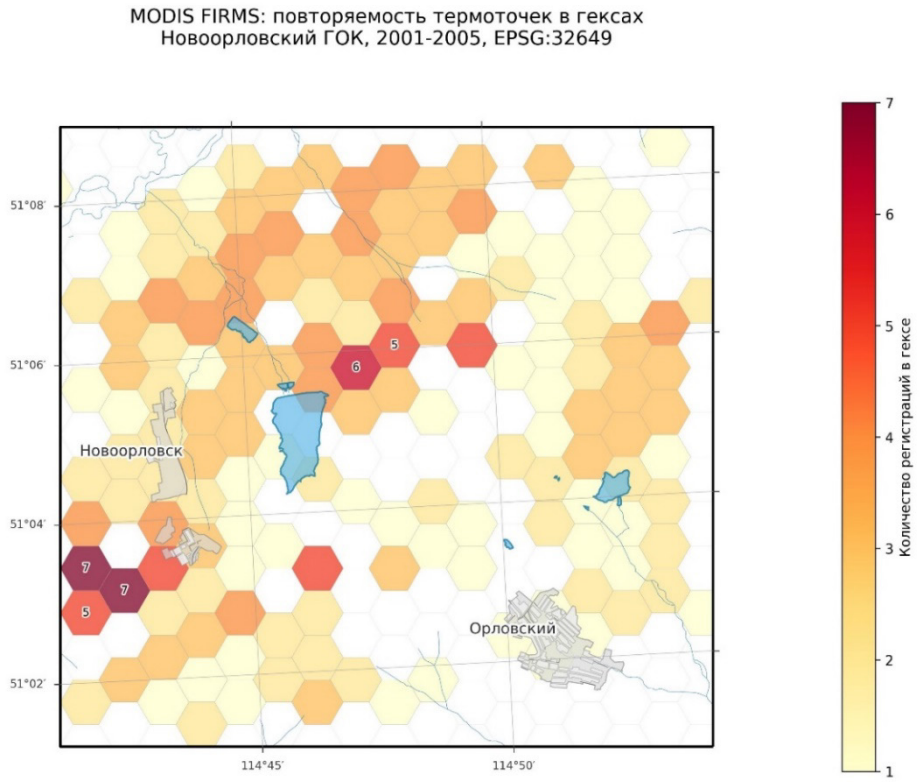


Рисунок 3. Повторяемость термоточек в гексах за период 2001–2005 гг.
Figure 3. Repeatability of heat points in hex for the period 2001–2005

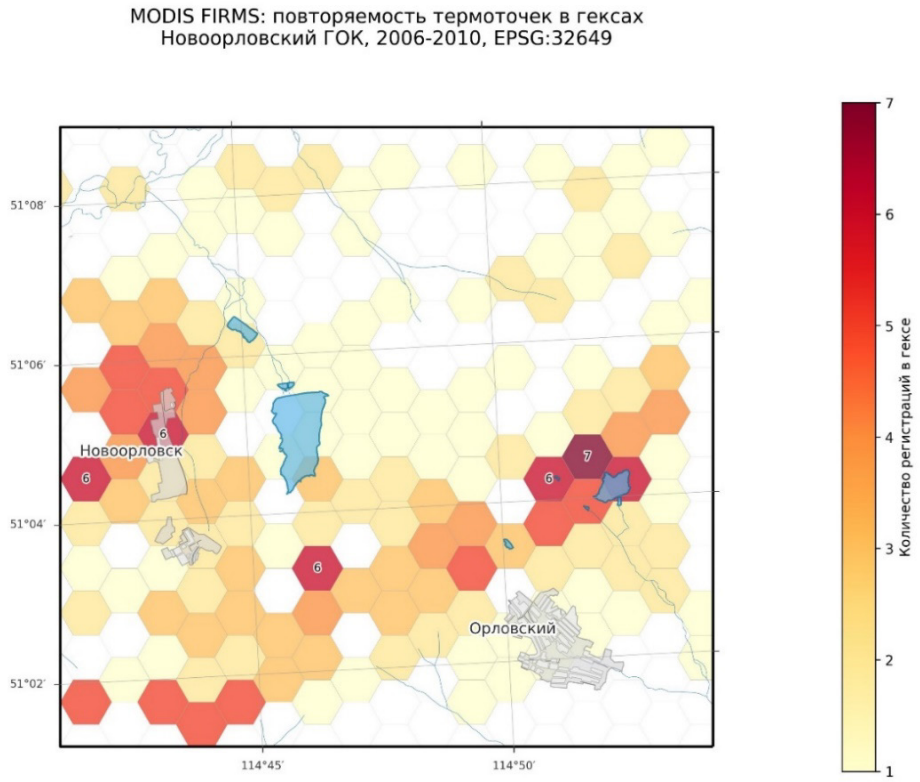


Рисунок 4. Повторяемость термоточек в гексах за период 2006–2010 гг.
Figure 4. Repeatability of heat points in hex for the period 2006–2010

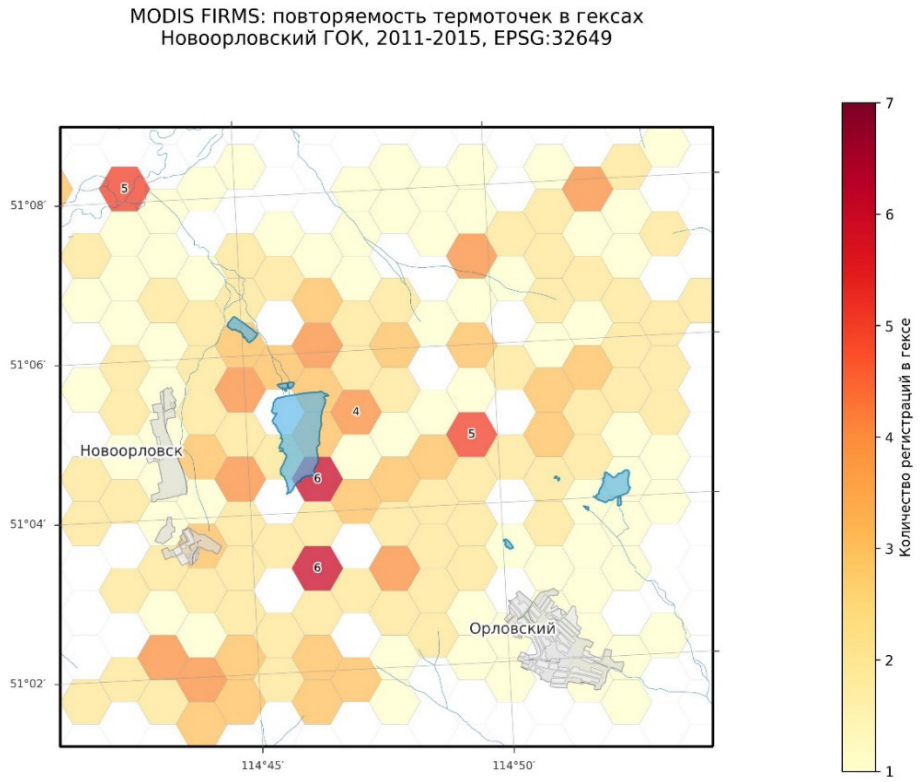


Рисунок 5. Повторяемость термоточек в гексах за период 2011–2015 гг.
Figure 5. Repeatability of heat points in hex for the period 2011–2015

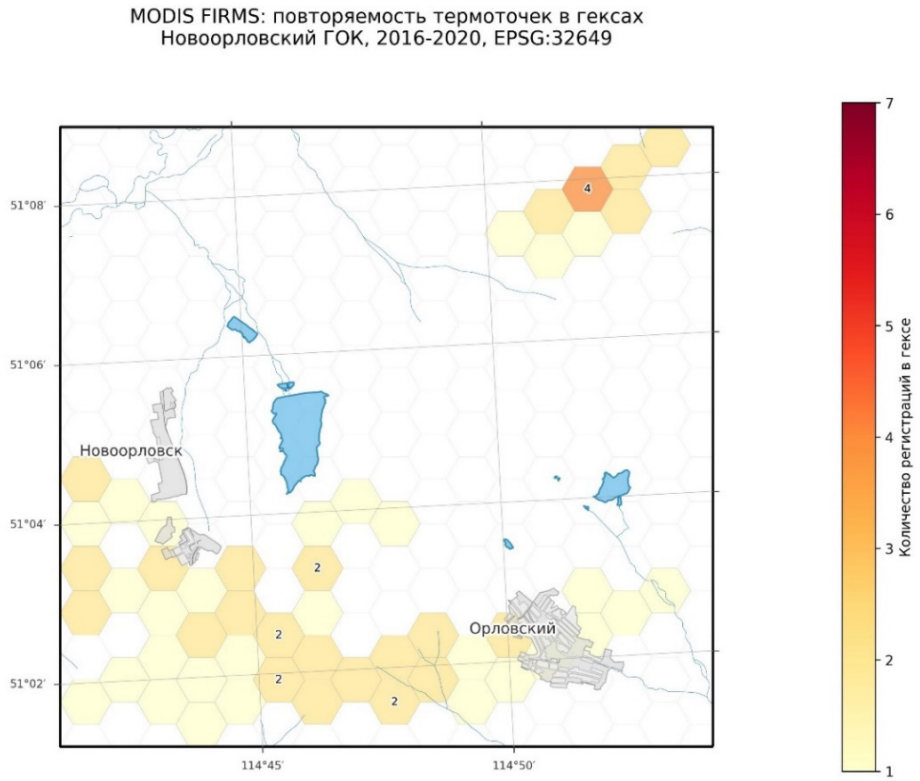


Рисунок 6. Повторяемость термоточек в гексах за период 2016–2020 гг.
Figure 6. Repeatability of heat points in hex for the period 2016–2020

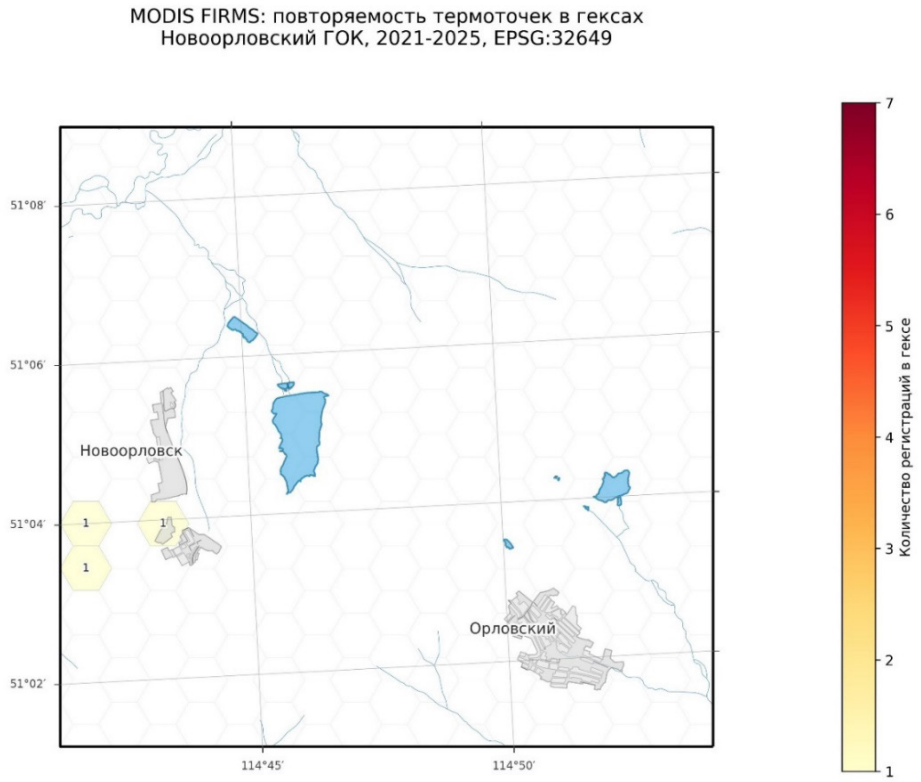


Рисунок 7. Повторяемость термоточек в гексах за период 2021-2025
Figure 7. Repeatability of heat points in hex for the period 2021-2025

Сопоставление пяти карт позволяет выделить общую тенденцию снижения пространственной насыщенности участков земной поверхности, температура которых аномально выше фоновых значений окружающей среды (т.н. термоточек) от первых трех пятилетних периодов к двум последним. В 2001–2005, 2006–2010 и 2011–2015 гг. термические аномалии формируют широкое поле регистраций с несколькими локальными максимумами. Эти максимумы последовательно проявляются в юго-западной части участка, вблизи Новоорловска, в центральной зоне около основного хвостохранилища и в восточной части у техногенного водоема. После 2015 г. поле термической активности становится разреженным, а к периоду 2021–2025 гг. сохраняются только единичные регистрации. Данная динамика указывает на существенную трансформацию пожарно-термического режима территории за период спутниковых наблюдений.

Наиболее значимыми для дальнейшей интерпретации являются три пространственные зоны. Первая зона расположена западнее и юго-западнее Новоорловска, где максимумы повторяемости хорошо выражены в периодах 2001–2005 и 2006–2010 гг., а единичные регистрации сохраняются и в 2021–2025 гг. Вторая зона соответствует центральной части участка, прилегающей к основному хвостохранилищу и связанным с ним водным объектам, где наибольшая выраженность наблюдается в 2011–2015 гг. Третья зона находится восточнее пгт. Орловский, в районе отдельного техногенного водоема и элементов гидрографической сети, где максимум проявляется в 2006–2010 гг. Выделение этих зон важно для последующего сопоставления с контурами техногенных скоплений, материалами Sentinel, Landsat, данными БПЛА и результатами полевых обследований.

Полученные карты показывают, что термические аномалии пространственно связаны не только с селитебными территориями, но и с природно-техногенным окружением хвостохранилищ, водных объектов и нарушенных земель. Это позволяет рассматривать слой

MODIS FIRMS как дополнительный элемент цифровой характеристики горнопромышленной геосистемы. Он дополняет сведения о техногенных объектах, гидрографии и населенных пунктах, формируя основу для оценки внешних факторов, влияющих на состояние территории хранения техногенного сырья, устойчивость растительного покрова и условия комплексного восстановления нарушенных земель.

Гексагональная агрегация имеет особое значение для научной интерпретации карт, поскольку она переводит точечные регистрации MODIS в площадные показатели повторяемости. Такой переход позволяет рассматривать термические аномалии как пространственный процесс, связанный с участками территории, а не только как набор отдельных координатных событий. Для задач интерактивного картографирования и цифровой платформы проекта это повышает аналитическую ценность результата, поскольку гексагональные слои могут быть сопоставлены с границами хвостохранилищ, техногенными водоемами, зонами рекультивации, гидрографической сетью, транспортной инфраструктурой и результатами других видов дистанционного зондирования Земли.

Таким образом, карты пятилетней повторяемости MODIS FIRMS фиксируют долгосрочную пространственную перестройку пожарно-термического фона в районе Орловского и Новоорловского ГОКов. На ранних этапах наблюдений территория характеризовалась широким распространением термических аномалий и наличием нескольких устойчивых зон концентрации. В последующие периоды произошло сокращение числа активных ячеек и ослабление повторяемости. Полученные результаты целесообразно использовать как вспомогательный дистанционный слой при актуализации данных о техногенных объектах, выборе участков детального дешифрирования, планировании БПЛА-съемки, оценке условий биоремедиации и разработке экологически ориентированных инженерных решений для территорий техногенных скоплений Орловского и Новоорловского ГОКов.

Сезонность появления термоточек

Анализ помесячного распределения термоточек MODIS FIRMS показывает резко выраженную сезонную концентрацию термических аномалий в весенний период. За 2000–2025 гг. в пределах района Новоорловского и Орловского ГОКа зарегистрировано 1075 термоточек, из которых на апрель приходится 513 регистраций, на май – 333 регистрации, на март – 80 регистраций. Таким образом, только апрель и май формируют 846 регистраций, или около 78,7 %. При расширении весеннего интервала до марта, апреля и мая суммарное количество термоточек достигает 926 регистраций, что составляет около 86,1 % от общего числа наблюдений.

Полученная структура указывает на устойчивое преобладание весеннего пожарно-термического максимума. Летние месяцы характеризуются значительно меньшим количеством регистраций: в июне отмечено 59 термоточек, в июле – 11, в августе – 15. Осенний период выражен слабо: в сентябре зафиксирована 41 регистрация, в октябре – 23. В январе, феврале, ноябре и декабре термоточки в пределах выбранной рамки анализа отсутствуют. Такая картина свидетельствует о том, что термические аномалии в районе техногенных объектов Орловского ГОКа имеют не равномерное годовое распределение, а отчетливо выраженную сезонную приуроченность к периоду весеннего иссушения травянистой растительности.

Тепловая матрица «год × месяц» уточняет эту закономерность и показывает, что наиболее интенсивные события также сосредоточены преимущественно в апреле и мае. Особенно выделяется апрель 2014 г., когда было зарегистрировано 165 термоточек. Значимые месячные максимумы также отмечены в мае 2003 г., марте 2003 г., мае 2006 г., апреле и мае 2007 г. и апреле 2019 г. Такая повторяемость весенних максимумов в разные годы указывает на устойчивый сезонный механизм формирования термических аномалий, связанный с состоянием сухой надземной фитомассы, открытых степных участков, нарушенных земель и антропогенной активности вблизи населенных пунктов (рисунок 8).

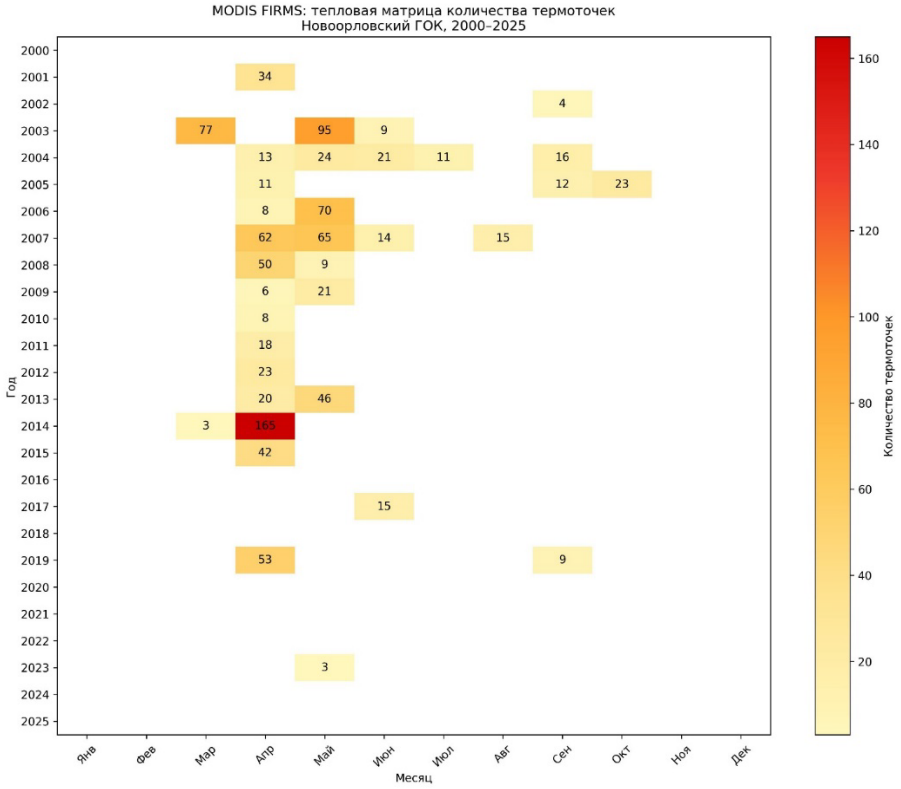


Рисунок 8. Тепловая матрица термоточек
Figure 8. Thermal matrix of thermal points

Сезонная структура термоточек хорошо согласуется с распространенной для степных и лесостепных районов Забайкалья практикой весеннего сжигания сухой травы (палов). В весенний период до начала активной вегетации на поверхности сохраняется значительный запас сухой прошлогодней растительности. При низкой влажности, ветровой активности и наличии открытых участков такой материал становится легко воспламеняемым. В этих условиях травяные палы могут быстро распространяться по степным и нарушенным территориям, формируя протяженные фронты горения, которые фиксируются MODIS FIRMS как группы термических аномалий (рисунок 9).

Для района Орловского и Новоорловского ГОКов такая интерпретация имеет важное прикладное значение. Термоточки весеннего периода могут отражать не только природную пожарную опасность, но и антропогенно обусловленные палы, возникающие в пределах сельскохозяйственных, селитебных, придорожных и техногенно нарушенных территорий. Их концентрация в апреле и мае показывает, что именно весенний сезон является критическим для оценки пожарно-термического фона горнопромышленной геосистемы. Это особенно важно при анализе состояния хвостохранилищ, техногенных водоемов, открытых нарушенных поверхностей и участков, рассматриваемых как потенциальные зоны биоремедиации.

Полученная сезонность показывает, что при разработке экологически ориентированных инженерных решений необходимо учитывать весенний фактор термического воздействия на прилегающие территории. Повторяющиеся весенние палы могут влиять на устойчивость растительного покрова, состояние поверхностного слоя техногенных почвогрунтов, скорость восстановления нарушенных земель и риски повторной деградации рекультивируемых участков. Поэтому слой MODIS FIRMS может использоваться как дополнительный индикатор сезонного пожарно-термического риска при выборе участков детального дешифрирования, планировании БПЛА-съемки и обосновании мероприятий комплексного восстановления

территорий действующих и законсервированных хвостохранилищ.

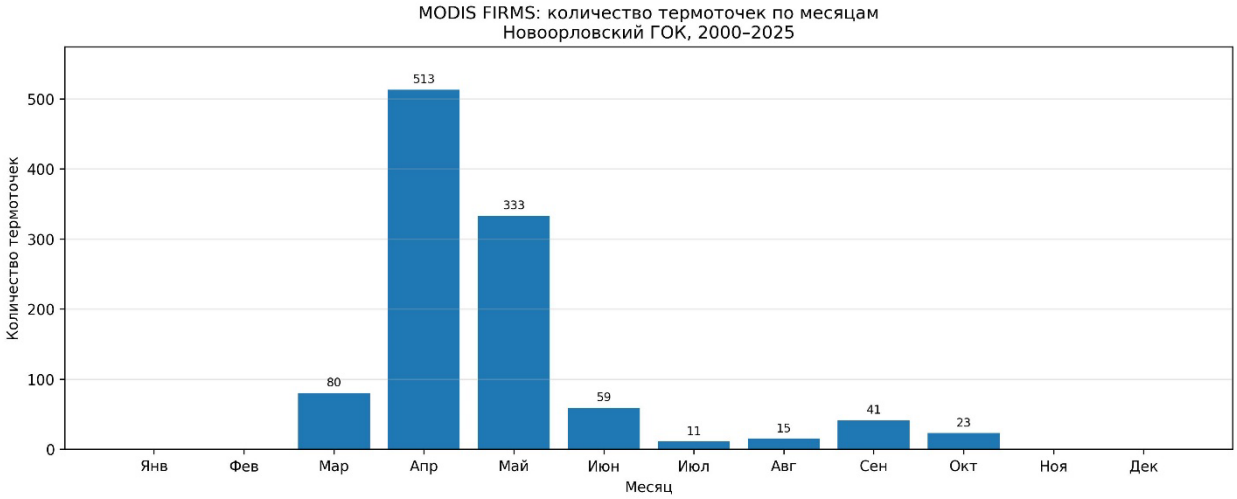


Рисунок 9. Количество термоточек по месяцам за 25-летний период
Figure 9. Number of temperature points by month over a 25-year period

Заключение

На основе 26-летнего ряда данных MODIS FIRMS (1075 регистраций) установлено, что пирогенный фактор является значимым элементом геоэкологического риска для хвостохранилища Новоорловского ГОКа. Основной вклад (92,5 % событий) приходится на 2001–2015 гг., после чего наблюдается устойчивое снижение термической активности.

Выявлена жесткая сезонная приуроченность: 78,7 % всех термоточек регистрируется в апреле–мае, что указывает на доминирование антропогенных весенних палов сухой растительности. Пиковые события (апрель 2014 г. – 165 точек) носят кратковременный, но площадный характер.

Пространственный анализ с использованием гексагональной агрегации позволил оконтурить три зоны устойчивой концентрации термоточек, непосредственно примыкающие к техногенным объектам. Их локализация должна учитываться при планировании рекультивационных мероприятий.

Слой MODIS FIRMS рекомендовано включить в качестве обязательного компонента в систему комплексного геоэкологического мониторинга действующих и законсервированных хвостохранилищ Орловского и Новоорловского ГОКов. При проектировании биологической рекультивации, фиторемедиации [9] необходимо предусматривать создание противопожарных минерализованных полос, особенно на участках, соответствующих выявленным потенциально опасным территориям.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на сопряжение данных FIRMS с мультиспектральными снимками высокого разрешения и полевой верификацией для количественной оценки ущерба растительному покрову и степени активизации пыления.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 26-17-20004, https://rscf.ru/project/26-17-20004/.

Acknowledgements

The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation No. 26-17-20004, https://rscf.ru/project/26-17-20004/.

Литература / References

1. Шекиладзе В. Т. Обоснование выбора эффективных водорастворимых полимеров для практического применения их при биологической рекультивации хвостохранилищ (на примере

объекта ЗАО «Новоорловский ГОК») // Вестник Забайкальского государственного университета. 2015. №4. С.71–78. EDN ULWXLR.
Shekiladze V. Substantiation of the Effective Water-Soluble Polymers Choice for Practical Use in Biological Recultivation of Tailings Dump (on the example of JSC «Novoorlovsky GOK»). Transbaikal State University Journal, 2015, iss.4, pp.71–78.

2. Антамошкин О. А., Худякова Е. В., Ермолаева О. С., Водянников В. Т. Автоматизированная оценка потенциальной стабильности хвостохранилищ на основе интеграции ГИС и методов искусственного интеллекта // Известия Тульского государственного университета. 2025. № 4. С. 96–102. EDN MSWXFH.
Antamoshkin O.A., Khudyakova E.V., Ermolaeva O.S., Vodyannikov V.T. Automated assessment of potential stability of tailings storage facilities based on the integration of GIS and artificial intelligence methods. Izvestiya Tula State University, 2025, iss.4, pp.96–102.

3. Шерхов А. Х. Результаты анализа современных данных геоэкологического мониторинга заброшенного Тырныаузского хвостохранилища // Вестник геонаук. 2025. № 9 (369). С. 28–35. DOI: 10.19110/geov.2025.9.4. EDN: ZZQGNS
Sherkhov A. Results of analysis of modern geocological monitoring data of the abandoned Tyrnyauz tailings facility. Vestnik of Geosciences, 2025, iss. № 9 (369), pp. 28–35. DOI: 10.19110/geov.2025.9.4.

4. Кочев Д. В., Шумилова Л. В. Применение спектральных водных индексов на хвостовом хозяйстве Дарасунского рудника по данным дистанционного зондирования Земли программы Landsat // Вестник Забайкальского государственного университета. 2023. Т. 29, № 2. С. 45–60. DOI 10.2109/2227-9245-2023-29-2-45-60. EDN VWZNGB.
Kochev D.V., Shumilova L.V. Application of Spectral Water Indices on the Tailings of the Darasunsky Mine According to the Remote Sensing Data of the Landsat Program. Transbaikal State University Journal, 2023, vol. 29, iss 2, pp. 45–60. DOI 10.2109/2227-9245-2023-29-2-45-60.

5. Пшеченкова Е. П., Самсонов А. А., Бурмистров А. А. и др. Использование данных дистанционного зондирования Земли для анализа экологической нагрузки техногенных объектов Михайловского горно-обогатительного комбината // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. – 2024. Т. 63, № 6. С. 120–131. DOI: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-6-120-131. EDN: EPDLHV.
Pshechenkova E.P., Samsonov A.A., Burmistrov A.A., Churikov Yu.A., Anisimov N.N., Starostin V.I. The Use of Earth Remote Sensing Data to Assess the Environmental Impact of the Mining Waste Facilities of the Mikhailovsky Mining and Processing Plant. Moscow University Geology Bulletin, 2024, Vol. 63, iss. 6, pp.120–131. DOI: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-6-120-131.

6. Giglio L., Schroeder W., Justice C. O. The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products // Remote Sensing of Environment. 2016. Vol. 178. P. 31–41. DOI: 10.1016/j.rse.2016.02.054.

7. Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone // Remote Sensing of Environment. 2017. Vol. 202. P. 18–27. DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031.

8. Birch C. P. D., Oom S. P., Beecham J. A. Rectangular and hexagonal grids used for observation, experiment and simulation in ecology // Ecological Modelling. 2007. Vol. 206, No. 3–4. P. 347–359. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2007.03.041.

9. Huang M., Liu Z., Li X. Phytoremediation of Rare Tailings-Contaminated Soil // Journal of Renewable Materials. 2022. Vol. 10, No. 12. P. 3351–3372. DOI: 10.32604/jrm.2022.022393.

Поступила в редакцию / Received 06.08.2026
Принята к публикации / Accepted 13.08.2026

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кочев Денис Владимирович, старший преподаватель, Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия; SPIN-код: 6153-4450, ORCID: 0000-0002-7833-9712; e-mail: denis.ko4ev@yandex.ru.

Шумилова Лидия Владимировна, доктор технических наук, профессор, Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия, SPIN-код: 4275-3458, ORCID: 0000-0001-5991-9204; e-mail: shumilovalv@mail.ru.

Свалова Кристина Витальевна, кандидат технических наук, доцент кафедры строительства, Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия; SPIN: 4931-2404, ORCID: 0000-0002-3644-5242; e-mail: kristi24091990s@yandex.ru.

Насоловец Константин Валерьевич, аспирант, Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия; e-mail: nasolovets@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Denis V. Kochev, Senior Lecturer, Transbaikal State University, Chita, Russia; SPIN-code: 6153-4450, ORCID: 0000-0002-7833-9712; e-mail: denis.ko4ev@yandex.ru.

Lidiya V. Shumilova, D. Sc. (Technical), Professor, Transbaikal State University, Chita, Russia; SPIN-code: 4275-3458; ORCID: 0000-0001-5991-9204; e-mail: shumilovalv@mail.ru.

Kristina V. Svalova, Ph. D. (Technical), Associate Professor, Department of Construction, Transbaikal State University, Chita, Russia; SPIN-code: 4931-2404; ORCID:0000-0002-3644-5242; e-mail: kristi24091990s@yandex.ru.

Konstantin V. Nasolovets, postgraduate student, Transbaikal State University, Chita, Russia; e-mail: nasolovets@mail.ru.

МЕТОДЫ, МОДЕЛИ И ТЕХНОЛОГИИ
METHODS, MODELS AND TECHNOLOGIES

Научная статья / Scientific paper

УДК 634.131.7

DOI: 10.34753/HS.2026.8.2.187

Уникальный и малоизвестный подвид техногенного псевдокарста

А. А. Лаврусевич[1,2], С. В. Шендяпина[3], И. А. Лаврусевич[3], О. Е. Вязкова[1], Л. Н. Трофимец[4], А. И. Абенэ[5], А.Ю. Виноградов[6]

[1]Российский государственный университет имени Серго Орджоникидзе, г. Москва, Россия

[2] Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России, федеральный центр науки и высоких технологий, г. Москва, Россия; [3]Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия; [4]Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева, г. Орел, Россия; [5]ООО Издательский центр «Академия», г. Москва, Россия; [6] ООО НПО «Гидротехпроект», г. Валдай, Россия

e-mail: lavrusevich@yandex.ru

Аннотация. В статье приводятся данные о сложном физико-химическом процессе, проявлением которого являются псевдокарстовые формы рельефа. На рассматриваемом объекте псевдокарст проявляется в виде провалов из-за перегруженных сводов техногенных пустот. Приведена классификация подвидов техногенного псевдокарста. Описанные в литературе примеры иллюстрируют формирование карстоподобных ландшафтов на той или иной территории под действием природных процессов при тесном взаимодействии с шахтами, тоннелями, карьерами и другими формами подземной экскавации горных пород. Это, так называемые, подработанные (природно-техногенные территории или системы). Развитие этого процесса, в рассматриваемом случае, также непосредственно связано с техногенезом. Описан уникальный и малоизвестный пример техногенного псевдокарста, связанного с оригинальной и весьма своеобразной формой утилизации подводных лодок. Подводные лодки проекта 611 выпущены в конце 1950-х годов, спущены на воду и затем введены в строй в составе вооруженных сил страны. В 1970-х годах выведены из эксплуатации для последующей утилизации. Однако, «жизнь» данной подводной лодки была продлена в результате использования ее в качестве заполнителя бетонной стены причала (пирса). Показано, что в суровых и холодных природных условиях Заполярья коррозия «съедает» даже высоколегированную сталь корпуса подводных лодок за десятилетия. Необычная форма утилизации подводной лодки (район мыса Зеленый, Нижне-Ростинское шоссе город Мурманск), привела к формированию весьма необычного подвида техногенного псевдокарста, оказывающего негативное влияние на устойчивость бетонированного уступа причала (пирса) Кольского залива. Фиксируемые провалы поверхности и локальные деформации плит перекрытия свидетельствуют о начальной стадии развития процесса разрушения природно-технической системы. Незнание особенностей механизма и скорости развития данного подвида техногенного псевдокарста, может инициировать дальнейшее развитие провалов и неожиданные социальный и экономический риски.

Ключевые слова: техногенный псевдокарст; подвид; Заполярье; подводная лодка; провалы; причал (пирс).

Для цитирования: Лаврусевич А. А., Шендяпина С. В., Лаврусевич И. А., Вязкова О. Е., Трофимец Л. Н., Абенэ А. И., Виноградов А. Ю. Уникальный и малоизвестный подвид техногенного псевдокарста // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2026. Т. 8. Вып. 2. С. 187–197. DOI: 10.34753/HS.2026.8.2.187.

A Unique and Obscure Subtype of Technogenic Pseudokarst

Andrey A. Lavrusevich[1,2], Svetlana V. Shendyapina[3], Ivan A. Lavrusevich[3], Olga E. Vyazkova[1], Lyubov N. Trofimetz[4], Alisa I. Abene[5], Alexey Yu. Vinogradov[6]

[1]Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia; [2]All-Russian Scientific Research Institute of Civil Defense and Emergencies of the Russian Ministry for Emergencies, Moscow, Russia; [3]Moscow State Construction University, Moscow, Russia; [4]Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russia; [5]Publishing Center «Akademia» LLC, Moscow, Russia; [6]Scientific and Industrial Research Association "Gidrotehproekt", Valday, Russia

e-mail: lavrusevich@yandex.ru

Abstract. The article presents data on a complex physicochemical process manifested as pseudokarst landforms. At the site under consideration, pseudokarst is expressed by collapses resulting from overloaded roofs of technogenic voids. A classification of subtypes of anthropogenic (technogenic) pseudokarst is provided. Examples described in the scientific literature illustrate the formation of karst-like landscapes in various territories due to natural processes acting in close interaction with mines, tunnels, open pits, and other forms of subsurface rock excavation. These are referred to as "undermined" areas – natural-anthropogenic territories or systems. The development of this process in the case studied is also directly related to anthropogenesis (technogenesis). A unique and obscure example of technogenic pseudokarst associated with an original and highly specific method of submarine disposal is described. Project 611 (Zulu-class) submarines were produced in the late 1950s, launched, and subsequently commissioned into the country's armed forces. In the 1970s, they were decommissioned for subsequent scrapping. However, the operational life of this particular submarine was extended through its use as filler material within a concrete pier wall (jetty abutment). It is demonstrated that even high-alloy steel hulls of submarines undergo severe corrosion over several decades under harsh Arctic conditions. This unconventional form of submarine utilization (Cape Zeleny area, Nizhne-Rostinskoye Highway, Murmansk city) led to the formation of a highly unusual subtype of technogenic pseudokarst, which exerts a negative impact on the stability of the concreted bench of the Kola Bay pier. Recorded surface subsidences and local deformations of deck slabs indicate the initial stage of degradation of the geotechnical system. The lack of knowledge regarding the mechanism and rate of development of this specific subtype of technogenic pseudokarst may trigger further collapse propagation and pose unexpected social and economic risks.

Keywords: technogenic pseudokarst; subtype; High North (Zapolyarye); submarine; sinkholes; berth (pier).

For citation: Lavrusevich A. A., Shendyapina S. V., Lavrusevich I. A., Vyazkova O. E., Trofimetz L. N., Abene A. I., Vinogradov A. Yu. A Unique and Obscure Subtype of Technogenic Pseudokarst. Hydrosphere. Hazard processes and phenomena, 2026, vol. 8, iss. 2, pp. 187–197. DOI: 10.34753/HS. 2026.8.2.187. (In Russian; abstract in English).

Введение

Псевдокарст (ложный карст) – западинно-впадинный рельеф, образованный понижениями разного размера, внешне напоминающий карст, но возникший в результате иных процессов [1]. Более ста лет шла дискуссия о содержании понятия «псевдокарст». Изучению «карстоподобных» форм рельефа, образованных в результате иных процессов, посвящены многочисленные публикации отечественных и зарубежных авторов. Основное отличие псевдокарста от карстового процесса – отсутствие растворимых пород, состоящих из неустойчивых к воде минералов классов карбонатов, сульфатов и галоидов, хотя основные формы рельефа как подземные, так и поверхностные, одинаковы. В литературе отмечены случаи техногенного псевдокарста в карбонатных породах [2]. Очевидно, в этом случае можно применить термин «карст на подработанных территориях»[1]. Классификация видов псевдокарста представлена в работе [3, 4, 5 и др.]. В таблице 1, под номером 7 представлен Техногенный псевдокарст – technogenic pseudokarst. Остановимся на этом виде псевдокарста подробнее.

[1] СП 21.13330.2012. Здания и сооружения на подрабатываемых территориях и просадочных грунтах. Часть 1. Здания и сооружения на подрабатываемых территориях

Таблица 1. Выделенные подвиды техногенного псевдокарста
Table 1. Distinguished subtypes of technogenic pseudokarst

Подвиды техногенного псевдокарста	1	Деформации поверхности (провалы, оседания, деформации сооружений) на подработанных территориях над горными выработками
	2	Деформации поверхности (провалы, оседания, деформации сооружений) над выгоревшими шахтными выработками горных пород
	3	Провалы в искусственных емкостях (полостях), в том числе в конструктивных элементах подводных лодок, используемых в строительных целях
	4	Провалы и деформации поверхности на застроенных территориях (объекты исторической застройки, подвалы, погреба, склепы, тайники, галереи и пр.)
	5	Провалы и деформации поверхности на участках захоронения бытовых отходов (неравномерное гниение органики, с последующим формированием ослабленных зон и полостей).
	6	Провалы и деформации поверхности в местах захоронения промышленных и ТБО в многолетнемерзлых породах за счет деградации мерзлоты
	7	Деформации (провалы) поверхности прибрежной зоны морей и водохранилищ в результате совокупного (комплексного) воздействия процессов абразии, суффозии и подземной эрозии

Материалы и методы

Внезапное обрушение перегруженных сводов техногенных пустот – особый вид псевдокарстовой опасности. В классификации видов псевдокарста он назван техногенным. Иштван Эстерхас разработал «концепцию техногенного псевдокарста» [6]. Суть концепции заключается в следующем: карстоподобные ландшафты формируются на той или иной территории под действием природных процессов при тесном взаимодействии с шахтами, тоннелями, подземными карьерами и другими формами подземной экскавации горных пород, это так называемые, подработанные природно-техногенные территории (системы). Эти формы имеют следующие характерные именно для них особенности, которые проявляются на поверхности земли, как правило, в виде прямолинейных провалов и оседаний, хотя встречаются и изометрические формы, которые обычно отражают серьезные проблемы, которые возникают под поверхностью земли. Некоторые районы до такой степени осложнены данными формами рельефа: провалы, оседания, воронки, трещины, пещеры и т.д., что превращаются в техногенный бедленд. Это территория, ограниченная со всех сторон многочисленными трещинами, пещерами и провалами. И. С. Степанов описывает техногенный псевдокарст в Кизиловском угольном бассейне, который приурочен к провалам над угольными шахтами. Встречаются псевдокарстовые формы, формирование которых обусловлено подземным горением в угольных пластах. В результате на поверхности образуются провальные полосы протяженностью почти до 800 и шириной до 300 м [7]. Е. Ф. Станкевич описывает псевдокарст и техногенные провалы в Казани, которые возникают над искусственными пустотами – старыми подвалами, погребами, подземными ходами, убежищами и др. [8]. Р. Х. Халимов описывает техногенный псевдокарст в лессовых породах, который достаточно широко распространен в Узбекистане [9]. Авторы наблюдали многочисленные техногенные псевдокарстовые формы рельефа в Китае (провинции Шанси и Шенси), когда первоначальное развитие и последующая активизация лессового псевдокарста вызваны большим количеством брошенных рукотворных пещер. Их создание первоначально нарушило единство лессового массива, а уничтожение дернового покрова и последующий «уход» Человека с этого массива, приводит к обветшанию (деградации) пещер, нарушению созданного человеком зарегулированного стока, и началу развития псевдокарста, который, встречая в массиве техногенные полости длиной до 60 м – многократно увеличивается. Авторы неоднократно наблюдали в Китае разрушение

псевдокарстом (придолинный тип), вызванным техногенезом, массивов лесса площадью до нескольких десятков гектаров [4]. Исследуя техногенный псевдокарст, появляется необходимость введения классификации его подвидов, которая приведена в таблице. Безусловно, мы не претендуем на всеохватывающую классификацию, но, это стремление авторов систематизировать подвиды именно техногенного псевдокарста по генезису механизма образования (формирования) пустот и ослабленных зон, над которыми впоследствии формируются деформации (см. таблицу).

Как видно из приведенной выше таблицы, псевдокарстовые формы рельефа образуются не одним, а целым комплексом (парагенезисом) различных процессов, в результате которых формируются сначала подземные, а затем и поверхностные формы рельефа. Из-за различных процессов, проходящих в горных породах различной литологии, и искусственных материалов (металл, пластик, органика, техногенный грунт и др.) образуются промежуточные или образованные комплексом процессов псевдокарстовые формы рельефа. Кроме того, карстоподобные полости, провалы и понижения также формируются в плохо растворимых породах. Например, уникальные псевдокарстовые пещеры среди гранитных валунов на Сейшельских островах сформированные за счет выветривания, эрозии и абразии.

Обсуждение результатов

Авторы, изучая псевдокарстовые явления на протяжении последних десятилетий, столкнулись с уникальным и малоизвестным подвидом техногенного псевдокарста. Мыс Зелёный в Мурманске известен тем, что он фактически находится у подножия сопки со знаменитым мемориалом защитникам Заполярья, недалеко памятник «Ждущая» – женщине, ждущей своего моряка, и тем, что на нём находится судоразделочная база, а также замурованной в причал подводной лодкой проекта 611 (рисунки 1 и 2). Разделка судов сегодня не ведется с той интенсивностью, как раньше, а часть базы теперь занимает причал, который построили для сброса снега, с которого местные жители и туристы любят ловить рыбу. Место тихое и привлекает любителей отдохнуть, посмотреть на проходящие корабли и подышать свежим морским воздухом.

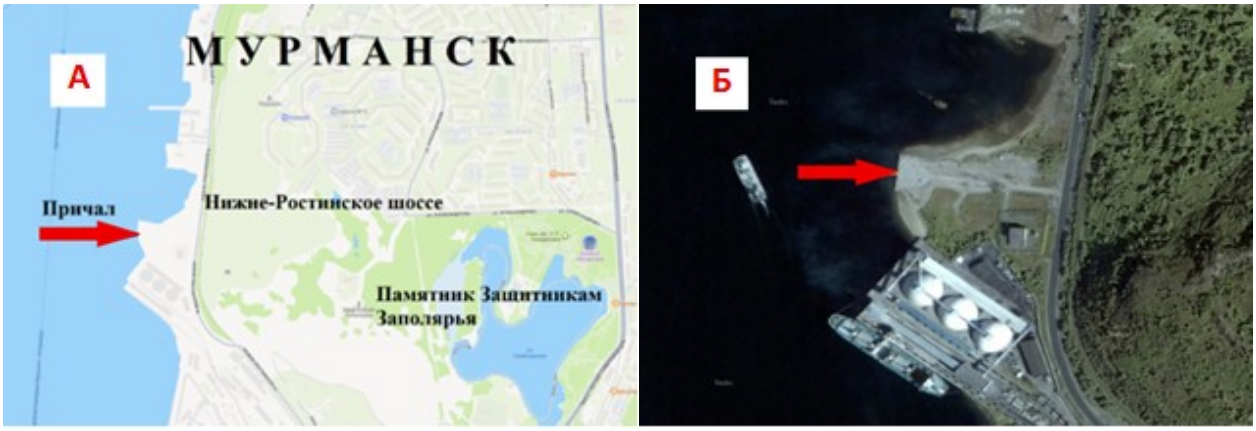
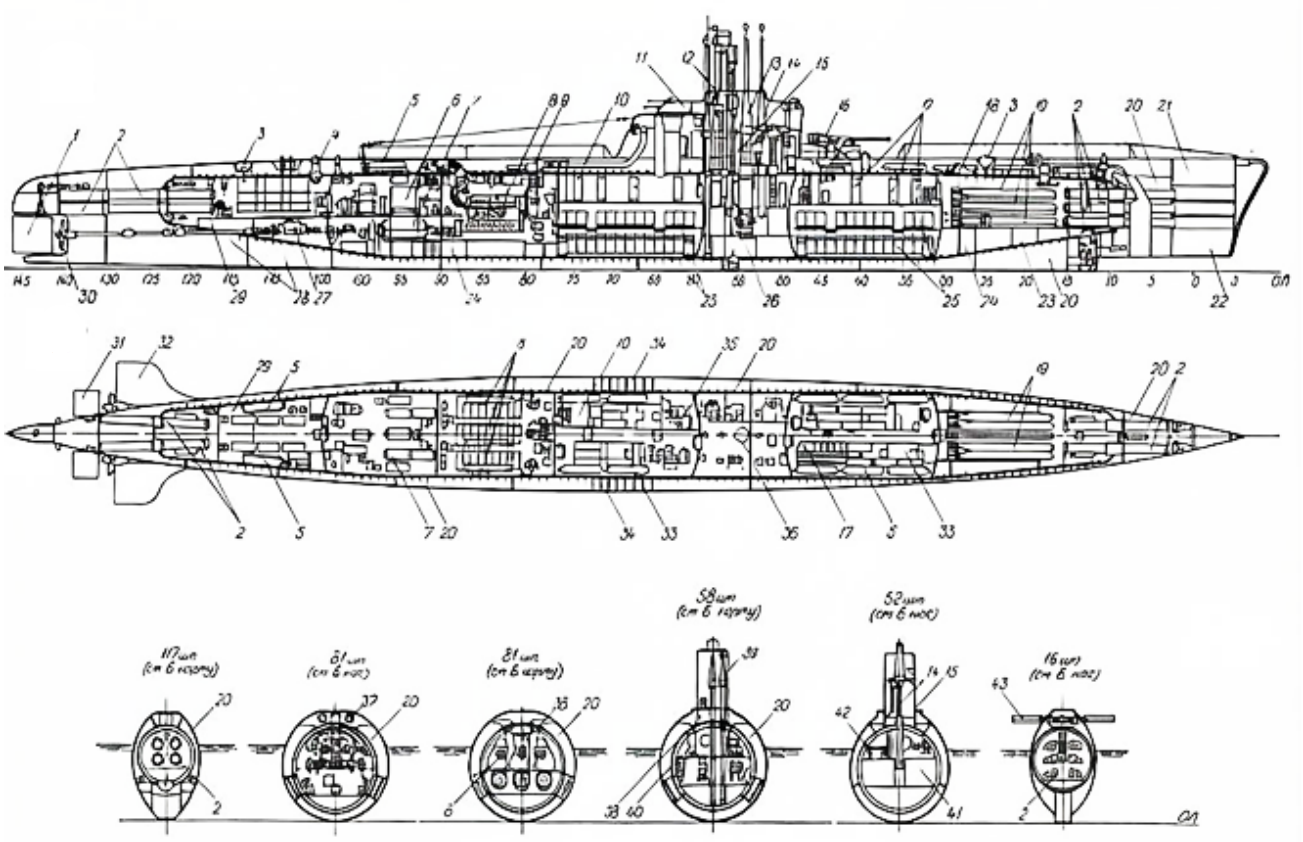


Рисунок 1. Схемы (А, Б) расположения объекта. Стрелками показан причал (пирс), в котором находится подводная лодка

Figure 1. Schematic diagrams (A, B) of the facility location. The berth (pier) housing the submarine is indicated by arrows



1 – перо руля; 2 – торпедный аппарат; 3 – телефонный буй аварийной связи; 4 – входной люк с тубусом; 5 – баллоны воздуха высокого давления (ВВД); 6 – щит управления гребными электродвигателями; 7 – гребной электродвигатель; 8 – двигатель 37Д; 9 – наружный клапан шахты подачи воздуха к дизелям; 10 – камбуз; 11 – артиллерийская установка 2М-8 (25 мм); 12 – устройство РДП; 13 – перископ атаки; 14 – зенитный перископ; 15 – прочная рубка; 16 – артиллерийская установка СМ-24-ЗИФ (57 мм); 17 – офицерское помещение; 18 – торпедно-погрузочный люк; 19 – запасные торпеды; 20 – цистерна главного балласта; 21 – цистерна плавучести; 22 – приемник шумопеленгатора; 23 – носовая дифферентная цистерна; 24 – топливная цистерна внутри прочного корпуса; 25 – аккумуляторная батарея; 26 – цистерна быстрого погружения; 27 – электродвигатель экономического хода; 28 – междубортная топливная цистерна; 29 – кормовая дифферентная цистерна; 30 – гребной винт; 31 – кормовой горизонтальный руль; 32 – стабилизатор; 33 – помещение команды; 34 – уравнительная цистерна; 35 – рубка радиосвязи; 36 – центральный пост; 37 – трубопровод подачи воздуха к дизелям; 38 – трубопровод РДП; 39 – антенна активной радиолокационной связи; 40 – прибор управления торпедной стрельбой; 41 – артиллерийский погреб; 42 – рубка штурмана; 43 – носовые горизонтальные рули

Рисунок 2. Продольный разрез план и сечение подводной лодки проекта 611[2]
Figure 2. Longitudinal section, plan view, and cross-section of the Project 611 submarine[2]

Однако, кажущаяся идиллия, весьма обманчива. Причал представляет собой ряд «составленных» параллельно берегу фрагментов подводных лодок и кораблей, забутованных техногенным песчано-гравийным грунтом и перекрытых плитами (рисунок 3). Последняя к заливу, это ПЛ Б-73 (подводная лодка) проекта 611, основная часть которой замурована в бетон и является фундаментом и удерживающей причальную стенку бетонной набережной, крайней к Кольскому заливу.

[2] Энциклопедия отечественного подводного флота – https://deepstorm.ru/ DeepStorm. files/45-92/dts/611 /list.htm?ysclid= mlrzgbzkxe 4426 78485

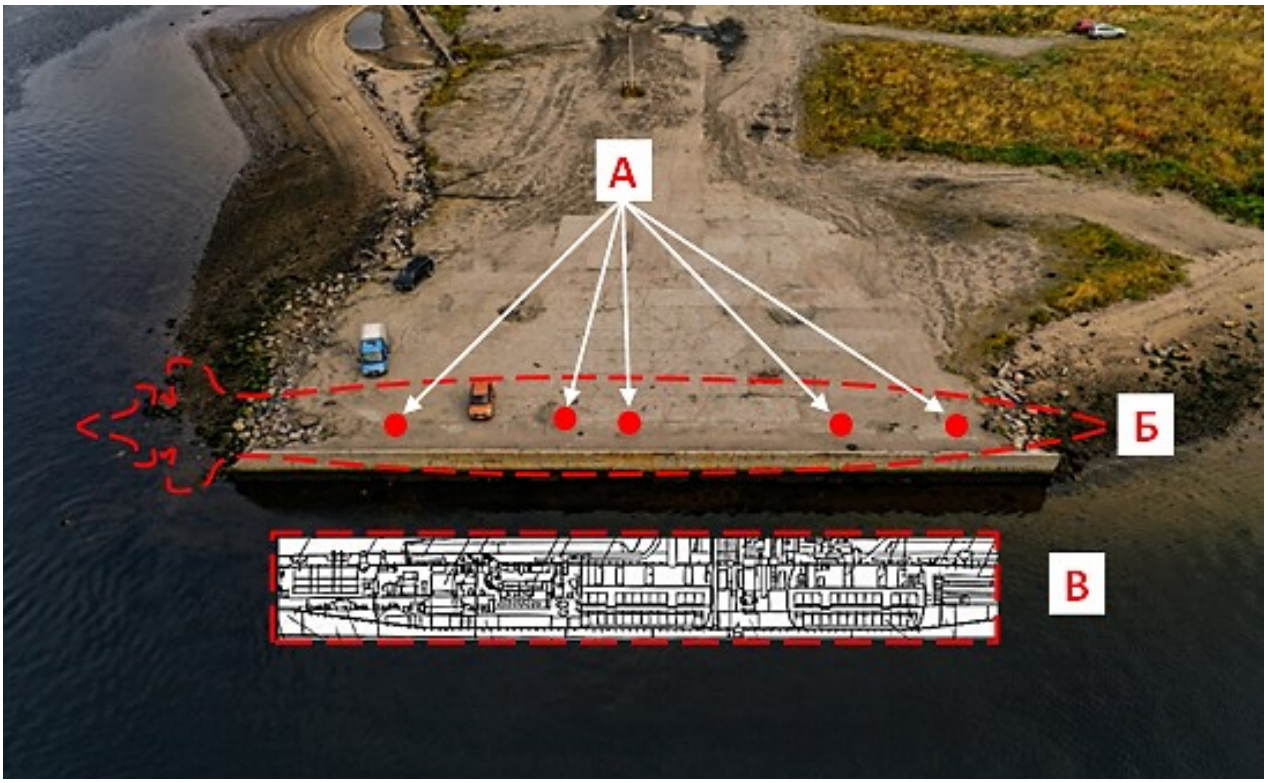


Рисунок 3. Вид на причал (пирс) сверху[3]:А – псевдокарстовые провалы (подземные полости), Б – контур подводной лодки проекта 611 (вид сверху, см. рисунок 2), В – контур подводной лодки проекта 611 (вид сбоку, см. рисунок 2)

Figure 3. Top-down view of the berth (pier)[3]: А – pseudokarst sinkholes, Б – plan view outline of the Project 611 submarine (see Figure 2), В – side profile of the Project 611 submarine (see Figure 2)

Стенка бетонного причала высотой 4 м и протяженностью более 70 м. Толщина ростверка 0,4 м. При отливах, в основании бетонной стены причала обнажаются входы в корпус залитой бетоном подводной лодки (рисунки 4 и 5).

В данном случае, мы имеем техногенную полость (отсеки подводной лодки), которые перекрыты маломощным слоем песчано-гравийной смеси и ж/б плитами. Однако, это не предотвращает коррозию высоколегированной стали подводной лодки, а наоборот способствует ее более активному разрушению.

Цилиндрический сварной корпус подводной лодки проекта 611 длиной 67,5 м выполнен из 18–22-мм стали, с необычным – наружным расположением шпангоутов, что позволило значительно увеличить объем внутренних помещений. Легкий наружный корпус идеально обтекаем, толщиной 3 мм, а у ватерлинии толщину довели до 8 мм в расчете на плавание во льдах. Лодка была построена и спущена на воду в 1957 г., после чего введена в строй. В конце 70-х годах XX века лодку списали и после этого должны были произвести демонтаж оборудования и утилизировать. Однако, лодка до сих пор «жива» и представляет собой уникальный объект для изучения коррозии металлов и общей деградации сооружения причала (пирса).

Разрушение металлической оболочки лодки и барьеров обусловлены коррозией, характер и скорость которой зависят от целого комплекса внутренних и внешних факторов. К определяющим внешним факторам, влияющим на коррозию, относят прежде всего климатические условия, минеральный состав морской воды, ее температуру, содержание

[3] Невероятная находка в Мурманске. Попали внутрь подводной лодки, забетонированной в пирс – https://dzen.ru/a/YT-svnNn50oUc1kO?ysclid=mqgn697h4x767427910

кислорода, биологическое воздействие (обрастание раковинами, водорослями и пр.), заиливание. К внутренним факторам, относятся: состав и структура металла, состояние поверхностей, наличие напряжений, деформаций, качество сварки и т.д. [10].



Рисунок 4. Бетонированная стенка причала[4]
Figure 4. Concrete-faced retaining wall of the berth



Рисунок 5. Внутренняя полость дизельного отсека ПЛ 73 проекта 611[2]
Figure 5. Diesel engine room interior, Project 611 submarine[2]

В Заполярье проблемы с коррозией обусловлены не только непростыми физико-химическими особенностями, но и особой спецификой региона (большие безжизненные и неосвоенные территории и одновременно зоны развитой промышленности с выбросами множества агрессивных химических соединений со всем комплексом экологических проблем и др.)

При низких температурах железо в морской воде разрушается с образованием гидроокиси, которая представляет собой продукт белого цвета с относительно невысокой растворимостью ($1{,}64\times10^{-8}$ г/л). В насыщенной кислородом воде она окисляется и переходит в гидрозакись – продукт оранжевого (бурого) цвета с очень низкой растворимостью ($4{,}8 \times 10^{-8}$ г/л).

[4] https://avatars.mds.yandex.net/get-altay/6264381/2a0000018f6c8b110657e00644d7ee5ff3cb/XXL_height

Гидроокись железа, будучи рыхлой, легко осыпается с вертикальных поверхностей.

В морской воде, где мало кислорода скорость коррозии в два-три раза ниже, чем в воде, насыщенной кислородом. Например, для Атлантического региона с повышенным содержанием кислорода она составляет 80–100 мкм/год, а в Северном Ледовитом океане – 40–50 мкм/год [11]. Внутри сложных технических конструкций в связи с низким водообменом она может быть в 5–10 раз меньше.

Применяя средневзвешенный подход, при котором за начальную скорость коррозии принимали результаты экспериментальных исследований, полученные в Арктическом регионе на глубинах более 400 м, соответствующие для углеродистых сталей 40–50 мкм/год и для нержавеющих сталей не более 2 мкм/год [12].

Например, для атомных объектов, связанных с радиационной реабилитацией на дне Арктического бассейна проведены расчеты коррозии легированных сталей оболочек подводных лодок. Оценка утраты защитных свойств барьеров затопленных объектов с отработавшим ядерным топливом и твердыми радиоактивными отходами, основана на общих методических подходах, изложенных в работах [11, 13, 14, 15].

Оценка представляет собой процедуру последовательных расчетов, учитывающих конкретные внешние условия затопления, конструктивные особенности объектов, гидрофизические характеристики морской среды, глубину погружения объекта, время нахождения объекта на дне и пр. Была разработана методика формализованной процедуры поэтапной оценки степени разрушения определенных защитных барьеров, которые существуют на затопленных ядерных радиационно-опасных объектах. В первую очередь, естественно начинают разрушаться конструктивы, изготовленные из наиболее тонкого металла. Были составлены обобщающие таблицы, где указано, что время разрушения основных защитных барьеров радиационно-опасных объектов морской водой в Карском море – крупногабаритные объекты с толщиной металлической оболочки 5 мм легких корпусов реакторных отсеков атомных подводных лодок, при глубине затопления до 20 м потери до 90 % массы составит 47±15 лет. Крупногабаритные объекты с толщиной металлической оболочки до 27 мм прочного корпуса реакторного отсека, атомной подводной лодки при глубине затопления до 20 м потери до 90 % массы составит 110±30 лет.

Однако, фактически мы фиксируем хорошо сформированные в результате коррозии сквозные (через внешнюю и внутреннюю оболочку подводной лодки) отверстия, проникающие во внутренние полости подводной лодки.

В настоящий момент, на поверхности причала отмечены несколько отверстий диаметром от 0,15 до 0,5 м, которые проходят через внешнюю и внутреннюю оболочки лодки, соединяя внутреннюю полость отсеков лодки с внешней средой. Можно даже наступить на уступ внутренней обшивки (рисунок 6). Формирование на горизонтальной поверхности причала в корпусе лодки подобных отверстий является показателем активного процесса коррозии и потенциальной опасности формирования провала большего диаметра при приложении большей нагрузки, например, наезд автомобиля, (несмотря на то, что поверхность перекрыта ж/б плитами).



Рисунок 6. Зафиксированные провалы на горизонтальной поверхности бетонного причала глубиной 4 м и диаметром до 0,4 м (отмечены красными стрелками)

Figure 6. Sinkholes on the horizontal surface of a concrete pier, with a depth of 4 m and a diameter of up to 0.4 m

Заключение

Использование искусственных полостей при строительстве промышленных, гидротехнических или гражданских сооружений показывает необходимость прогноза их устойчивости к воздействию внешних и внутренних факторов. Оригинальное и весьма необычное использование объема подводных лодок для строительства причала в городе Мурманск показывает, как коррозия в суровых условиях Заполярья, вызывает разрушение оболочки подводной лодки, построенной из высоколегированной стали. При нагрузках, вызванных воздействием более тяжелых механизмов (например, автомобиль) возможно формирование провалов большего диаметра и смещение техники в открывшийся внутренний отсек лодки.

Необходим комплексный подход, основанный на исследовании построенного сооружения как целостной системы, со своей структурой, свойствами, которые возникают в результате синергетического взаимодействия ее компонентов [3]. Именно системный подход, применяя теоретические и эмпирические методы исследований, позволяет комплексно рассмотреть исследуемый объект и сделать заключение о причинах и факторах, способствующих его развитию.

Человечество, вооруженное техникой, провоцирует деградацию естественных ландшафтов. Человек все сильнее преобразовывает верхние горизонты геологической среды, создавая для себя наиболее комфортные условия, внедряя искусственные полости в геологическую среду и одновременно провоцируя развитие и активизацию такого грозного феномена как псевдокарст.

Литература / References

1. Геологический словарь: в 3 т. / гл. ред. О. В. Петров. 3-е изд., перераб. и доп. СПб.: ВСЕГЕИ, 2011. Т. 2: К–П. 476 с.
2. Лаврусевич А. А., Лаврусевич И. А., Алешина Т. С., Аллабергенова Э. М., Кузнецова О. Г. Опасность развития техногенного псевдокарста (на примере участка в юго-западной части Крымского полуострова // Мат. X Междунар. науч.-практич. конф.по проблемам снижения природных опасностей и рисков. Геориск, 2018. С. 329–333.
Lavrusevich A. A., Lavrusevich I. A., Aleshina T. S., Allabergenova E. M., & Kuznetsova O.G. The hazard of technogenic pseudokarst development (on the example of a site in the southwestern part of the Crimean Peninsula). Proceedings of the X International Scientific and Practical Conference on Natural Hazards and Risk Reduction «GeoRisk-2018», 2018, pp. 329–333. (In Russian; abstract in English).

3. Лаврусевич А. А., Цуцупа Т. А., Салдин В. А., Лаврусевич И. А. Фитогенный псевдокарст и условия его формирования // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2021. № 1. С. 39–47. DOI: 10.31857/S0869780921010057
Lavrusevich A. A., Tsutsupa T. A., Saldin V. A., Lavrusevich I. A. Phytogenic pseudokarst and conditions of its formation Geoecology. Engineering Geology, Hydrogeology, Geocryology, 2021, no. 1, pp. 39–47. DOI: 10.31857/S0869780921010057. (In Russian; abstract in English).
4. Лаврусевич А. А., Крашенинников В. С., Лаврусевич И. А. Лёссовый псевдокарст и опыт укрепления лессовых массивов и откосов искусственными посадками некоторых растений (на примере лессового плато КНР, провинции Ганьсу и Шеньси) // Инженерная геология. №1, 2012. С.48–58.
Lavrusevich A. A., Krasheninnikov V. S., Lavrusevich I. A. Loess pseudokarst and experience in stabilizing loess massifs and slopes by artificial planting of certain plants (using the example of the Loess Plateau, Gansu and Shaanxi provinces, PRC). Engineering Geology, 2012, no. 1, pp. 48–58.
5. Halliday W. R. Pseudokarst in the 21 st century. Journal of Cave and Karst Studies, 69, 2007, pp.103–113.
6. Eszterhas I., Sarközi Sz. Introduction / Proceedings of the 6 International Symposium on Pseudokarst, Galyatetö, 1996, pp. 10–15.
7. Степанов И. С. Антропогенный псевдокарств Кизиловском угольном бассейне. В сб. Проблема псевдокарста. Тезис док. Пермь, 1992. С.44–45.
8. Станкевич Е. Ф. Псевдокарст и антропогенные провалы в Казани. / В сб. Проблема псевдокарста. Тезис док. Пермь, 1992. С.42–44.
9. Халимов Р. Х. Псевдокарст лессовых пород бассейна реки Гузардарьи. Псевдокарстовые воронки в лессовых породах Сумсар-Шардагских гор. // Проблема псевдокарста:Тез. Докл. Совещ., Кунгур, 15–16 дек. 1992. Пермь, 1992. С. 35–37.
10. Атомное наследие холодной войны на дне Арктики. Радиоэкологические и технико-экономические проблемы радиационной реабилитации морей / Саркисов А. А., Сивинцев Ю. И., Высоцкий В. Л., Никитин В. С. ; Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики РАН. М., 2015. 699 с.
11. Морская коррозия: Справочник / Под ред. М. Шумахера. М.: Металлургия, 1983. 237 с.
12. Антипов С. В., Высоцкий В. Л., Сивинцев Ю. В и др. Оценка выхода техногенных радионуклидов в морскую воду из затопленных ядерных и радиационно-опасных объектов в результате коррозии защитных барьеров в Арктическом и Дальневосточном регионах. М.: ИБРАЭ РАН,2010. 342 с.
13. Лавковский С. А., Кобзев В. Н., Лысцов В. Н. и др. Разработка научно-методических основ диагностирования и прогнозирования состояния захоронений ядерных отходов на дне Баренцева, Карского и Японского морей: Определение путей предотвращения опасных экологических последствий // Междунар. науч.-технич. Центр. Н.Новгород.: СКБ «Лазурит», 1998. 348 с.
14. Сивинцев Ю. В., Вакуловский С. М., Васильев А. П. и др. Техногенные радионуклиды в морях, омывающих Россию: Радиоэкологические последствия тяжелой радиационной аварии на атомной подводной лодке в бухте Чажма в 1985 г. // Атом. Энергия. 1994. Т. 76, вып. 2. С.158–160.
Sivintsev Yu. V., Vakulovsky S. M., Vasilyev A. P. et al. Technogenic radionuclides in the seas washing Russia: Radioecological consequences of a severe radiation accident on a nuclear submarine in Chazhma Bay in 1985. Atomic Energy, 1994, vol. 76, iss. 2, pp. 158–160. (In Russian; abstract in English).
15. Высоцкий В. Л., Сотников В. А., Хохлов И. Н. Руководство по расчету разрушения защитных барьеров затопленных, затонувших ядерных и радиационно-опасных объектов в Арктическом и Дальневосточном регионах и оценке скорости выхода техногенных радионуклидов в морскую воду. М.: ИБРАЭ РАН,2011. 61 с.

Поступила в редакцию / Received 01.08.2026
Принята к публикации / Accepted 18.08.2026

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лаврусевич Андрей Александрович, доктор геолого-минералогических наук, профессор, Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ), Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России, г. Москва, Россия; SPIN-код: 9383-1829; e-mail: lavrusevich@yandex.ru.

Шендяпина Светлана Валентиновна, кандидат технических наук, доцент, Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия; SPIN-код: 2974-4850; e-mail: ssh37@mail.ru.

Лаврусевич Иван Андреевич, кандидат технических наук, доцент, Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия; SPIN-код: 1750-0050; e-mail: 4914907@gmail.com.

Вязкова Ольга Евгеньевна, доктор геолого-минералогических наук, профессор, Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ), г. Москва, Россия; SPIN-код: 8597-3841, ORCID: 0000-0003-0927-3606; e-mail: wjask@yandex.ru.

Трофимец Любовь Никифоровна, кандидат географических наук, доцент, старший научный сотрудник, ОГУ им. И. С. Тургенева, г. Орел, Россия; SPIN-код: 9508-5650, ORCID: 0000-0003-1305-1053; e-mail: Trofimetc_l_n@mail.ru.

Абенэ Алиса Игоревна, главный специалист, ООО Издательский центр «Академия», г. Москва, Россия; SPIN-код: 2387-6814; e-mail: alice.abene@gmail.com.

Виноградов Алексей Юрьевич, доктор технических наук, генеральный директор, ООО НПО «Гидротехпроект», г. Валдай, Россия; WoS ResearcherID: D-3751-2016, ORCID: 0000-0001-8838-8676; e-mail: gd@npogtp.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Andrey A. Lavrusevich, D. Sc. (Geology and Mineralogy), Professor, Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia, All-Russian Scientific Research Institute of Civil Defense and Emergencies of the Russian Ministry for Emergencies, Moscow, Russia; SPIN-code: 9383-1829; e-mail: lavrusevich@yandex.ru.

Svetlana V. Shendyapina, Ph. D. (Technical), Docent, Moscow State Construction University, Moscow, Russia; SPIN-code: 2974-4850; e-mail: ssh37@mail.ru.

Ivan A. Lavrusevich, Ph. D. (Technical), Docent, Moscow State Construction University, Moscow, Russia; SPIN-code: 1750-0050; e-mail: 4914907@gmail.com.

Olga E. Vyazkova, D. Sc. (Geology and Mineralogy), Professor, Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia; SPIN-code: 8597-3841, ORCID: 0000-0003-0927-3606; e-mail: wjask@yandex.ru.

Lyubov N. Trofimetz, Ph. D. (Geography), Docent, Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russia; SPIN-code: 9508-5650, ORCID: 0000-0003-1305-1053; e-mail: trofimetc_l_n@mail.ru.

Alisa I. Abene, Leading Specialist, Publishing Center «Academia» LLC, Moscow, Russia; SPIN-code: 2387-6814; e-mail: alice.abene@gmail.com.

Alexey Yu. Vinogradov, D. Sc. (Technical), Director, NPO "Gidrotekhproekt", Valday, Russia; WoS ResearcherID: D3751-2016, ORCID: 0000-0001-8838-8676; e-mail: gd@npogtp.ru.

Научная статья / Scientific paper
УДК: 624.131.7
DOI: 10.34753/HS.2026.8.2.198

Роль инженерно-геологических условий в формировании и сохранении исторической природно-технической системы крепости Ям

О. Е. Вязкова[1], Ю. П. Стародубова[2], П. А. Игнатов[1], И. А. Лаврусевич[3], А. И. Абенэ[4], В. А. Обязов[5]
[1]Российский государственный университет имени Серго Орджоникидзе, г. Москва, Россия;
[2]Санкт-Петербургское отделение Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, г. Санкт-Петербург, Россия; [3]Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия; [4] ООО Издательский центр «Академия», г. Москва, Россия; [5]ООО НПО «Гидротехпроект», г. Валдай, Россия
e-mail: wjask@yandex.ru

Аннотация. Изучение архитектурно-археологических памятников истории и культуры методами, в том числе и инженерно-геологических исследований, позволяет получать ценную историческую информацию, приходить к пониманию обстоятельств создания и эксплуатации важных оборонительных сооружений в прошлом. На примере полностью разрушенной крепости Ям в г. Кингисеппе Ленинградской области показаны роль и значение инженерно-геологических условий (речной сети, геологического строения, тектонической трещиноватости, условий залегания и распространения подземных вод, интенсивности развития экзогенных геологических процессов) в долгосрочном безопасном функционировании исторических природно-технических систем. Приводится историческая справка, иллюстрирующая хронологию развития крепости Ям: особенности этапов строительства и эксплуатации, а также причины и последствия многократных переходов владения крепостью между русскими, шведскими и литовскими силами, что напрямую отражалось на смене планировочной структуры и фортификационного значения в разные временные периоды. Показано, что формирование природно-технической системы крепости Ям изначально было обусловлено выгодным геоморфологическим положением – объект возведен на внешней стороне излучины реки на выходах коренных пород – известняка, который послужил основанием и мог быть использован в качестве строительного материала, что увеличивало фортификационные преимущества крепости, позволяя сократить трудозатраты, наращивая высоту стен за счет высоты стенки рва. В статье проанализирована связь тектонической трещиноватости пород с ориентировкой спрямленных участков речной сети и ее влияние на расположение и форму крепости. Сделан вывод, что сохранность и устойчивость крепости, полностью зависевшая от качества материалов и работ, была нарушена вследствие деструктивных процессов в конструкциях стен берегового обвода, спровоцированных интенсивной боковой эрозией реки Луги.

Ключевые слова: крепость Ям; инженерно-геологические условия; историческая ПТС; сохранение архитектурно-археологических памятников истории и культуры.

Для цитирования: Вязкова О.Е., Стародубова Ю.П., Игнатов П.А., Лаврусевич И.А., Абенэ А.И., Обязов В.А. Роль инженерно-геологических условий в формировании и сохранении исторической природно-технической системы крепости Ям // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2026. Т. 8. Вып. 2. С.198–209. DOI: 10.34753/HS.2026.8.2.198.

The Role of Engineering-Geological Conditions in the Formation and Preservation of the Historical Natural-Technical System of the Yam Fortress

Olga E. Vyazkova[1], Yulia P. Starodubova[2], Pyotr A. Ignatov[1], Ivan A. Lavrusevich[3], Alisa I. Abene[4], Victor A. Obyazov[5]
[1]Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia;
[2]St. Petersburg Branch of the Institute of Geoecology named after E.M. Sergeev, Russian Academy of Sciences (RAS), St. Petersburg, Russia; [3]Moscow State Construction University, Moscow, Russia;
[4]Publishing Center «Akademia» LLC, Moscow, Russia; Scientific and Industrial Research Association "Gidrotehproekt", Valday, Russia
e-mail: wjask@yandex.ru

Abstract. The study of architectural and archaeological heritage sites using a multidisciplinary approach, including engineering geological investigations, yields valuable historical data and facilitates the reconstruction of circumstances surrounding the construction and operation of significant defensive fortifications in the past. Using the example of the completely ruined Yam Fortress in Kingisepp, Leningrad Oblast, this paper demonstrates the role and significance of engineering-geological conditions (river network patterns, bedrock structure, tectonic jointing, groundwater occurrence and distribution, and the intensity of exogenous geological processes) for the long-term safe functioning of historical natural-technical systems. A historical overview is provided, illustrating the chronology of the development of the Yam Fortress: specific features of its construction and operational phases, as well as the causes and consequences of multiple transfers of ownership between Russian, Swedish, and Lithuanian forces, which directly influenced changes in planning layouts and fortification value across different temporal periods. It is demonstrated that the formation of the technogenic-natural system of the Yam Fortress was initially determined by a favorable geomorphological setting – the object was erected on the outer bank of a river meander where bedrock outcrops occurred. These consisted of limestone, which served as the foundation strata and could be utilized as a primary building material. This enhanced the fortification advantages by allowing for reduced labor input while increasing wall height through the exploitation of the ditch scarp elevation. The article analyzes the correlation between tectonic jointing of rocks and the orientation of rectified segments of the drainage network, evaluating their combined influence on the positioning and geometric configuration of the fortress. It is concluded that the preservation and structural stability of the fortress, being entirely dependent on the quality of materials and masonry works, were compromised due to destructive mechanisms within the perimeter revetment structures. These failures were triggered by intensive lateral fluvial erosion of the Luga River.

Keywords: Yam Fortress; engineering-geological conditions; historical natural-technical system (NTS); conservation of architectural and archaeological heritage.

For citation: Vyazkova O. E., Starodubova Yu. P., Ignatov P. A., Lavrusevich I. A., Abene A. I., Obyazov V. A. The Role of Engineering-Geological Conditions in the Formation and Preservation of the Historical Natural-Technical System of the Yam Fortress. Hydrosphere. Hazard processes and phenomena, 2026, vol. 8, iss. 2, pp. 198–209. DOI: 10.34753/HS. 2026.8.2.198. (In Russian; abstract in English).

Введение

На Русском Севере, исторически являющемся рубежом с западным миром более тысячи лет, начиная с VII–VIII в. (Камно [1], Старая Ладога [2, 3, 4]), постепенно формировалась сеть оборонительных сооружений (таблица 1). Земли часто переходили из рук в руки, на них претендовали Русь, Швеция, рыцарские ордена Европы.

В настоящее время ученые с целью защиты и сохранения рассматривают древние оборонительные сооружения как исторические природно-технические системы (ИПТС) [5, 6, 7].

Таблица 1. Краткая история возникновения оборонительных сооружений на северо-западных границах Руси

Table 1. A brief history of the emergence of defensive structures on the north-western borders of Rus'

Время основания	ИПТС	Время основания	ИПТС
Ранее VIII в.	Городище Камно	1294 г.	Крепость Корела
753 г.	Крепость Старая Ладога	1323 г.	Крепость Орешек
862 г.	Труворово городище	1330 г.	Крепость Изборск
862 г.	Белозерское городище	1341 г.	Крепость Остров
903 г.	Крепость Псков	1384 г.	Крепость Ям
X в.	Тиверское городище	1387 г.	Крепость Порхов
1237 г.	Крепость Копорье	1431 г.	Крепость Гдов
1239 г.	Старопорховское городище	1436 г.	Соловецкий монастырь
1293 г.	Крепость Выборг	1492 г.	Крепость Ивангород

Большинство объектов культурного наследия некогда оборонительного назначения находится на территории Ленинградской и Псковской областей России. Многие из крепостей отреставрированы, имеют хорошее техническое состояние и пользуются заслуженной популярностью у туристов (Псков, Изборск, Ивангород, Корела, Орешек, Порхов и др.). Некоторые древние оборонительные объекты находятся в аварийном состоянии (Копорье) [8, 9], какие-то практически полностью разрушены, например, крепость в городе Остров, Тиверское городище и крепость Ям, являющаяся объектом представленного исследования.

Крепость Ям (Яма, Ямгород, Ямбург) расположена практически в центре города Кингисепп Ленинградской области, на правом берегу р. Луги.

Обычно инженерно-геологические исследования проводятся либо перед новым строительством, либо для выведения зданий и сооружений из аварийного состояния. В нашей же работе предлагается анализ инженерно-геологических условий, в которых создавалась и эксплуатировалась важная крепость, ныне уже не существующая как архитектурный объект. Зачем? Это знание о наших предках, их мышлении, способности исследовать и максимально грамотно использовать особенности среды обитания. Кроме того, полученные результаты помогут в подобных исследованиях других памятников, которые еще можно сохранить.

Целью изучения являлась оценка влияния инженерно-геологических условий участка расположения крепости Ям на выбор места для ее размещения, эксплуатацию и сохранность. В задачи входило изучение всех компонентов инженерно-геологических условий и оценка роли каждого из них в формировании и функционировании ИПТС.

Историческая справка

Для защиты северо-западных границ Новгородской республики в 1384 г. на р. Луге «на Яме» закладывается «город камен».

Историками выбор места расположения обосновывается пересечением двух торговых путей – водного (р. Луга) и сухопутного – постоянно действующая переправа через р. Лугу на пути из Новгорода в Европу [10].

Первое документально зафиксированное нападение шведов на крепость происходит уже в 1395 г. В то время крепость Ям представляла собой четырехбашенный детинец площадью 0,2 га (рисунок 1).

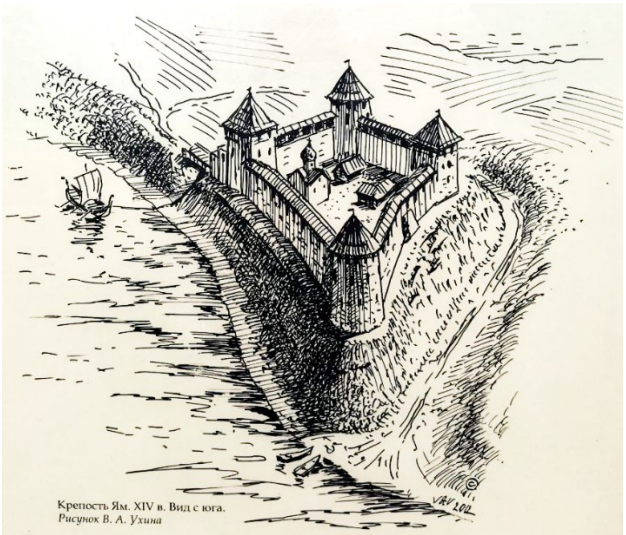


Рисунок 1. Крепость Ям, XIV в. Вид с юга. Рисунок В.А. Ухина[1]
Figure 1. Yam Fortress, 14th century. View from the south. Drawing by V.A. Ukhin[1]

[1]Ухин, В.А. Доклад о создании макета крепости Ям // Петровская научно-практическая историко-литературная конференция Исторического общества Ямбурга – Кингисеппа. – Кингисепп: Центральная городская библиотека, 6 июня 2023 г.

В XIV–XV вв. крепость Ям успешно отражает неоднократные нападения со стороны Шведского королевства и Ливонского ордена. Одним из крупнейших военных, административных, торгово-ремесленных центров Северо-запада Руси Ям становится на рубеже XV–XVI веков. Тогда же Ям начинают называть Ямгородом, в котором проживает около 1100 человек. К этому времени вокруг первоначальной крепости уже выстроен внешний обвод.

Внешний обвод строится в 1448 г. и представляет собой шести (девяти) башенную крепость, предназначенную для адаптации крепости к широкому распространению порохового оружия. С востока на планах крепости появляется пруд, сообщающийся с северным рвом. Пруд существует на том же месте до настоящего времени. Общая площадь новой крепости составляет около 2,5 га (рисунок 2).



Рисунок 2. План крепости Ям. 1690 г. Швеция, Королевский военный архив[2]
Figure 2. Plan of the Yam Fortress. 1690. Royal Military Archives, Sweden[2]

[2] https://war16-17.blogspot.com/2012/04/blog-post.html

Шведский полководец Якоб Понтуссон Делагарди впервые захватывает крепость в 1581 г. В 1590 г. она снова отвоевана русскими войсками, а с 1612 г. на протяжении почти сотни лет крепость Ям принадлежит шведам.

В конце XVII века в крепость прибывает шведский инженер-фортификатор Э. Дальберг. В своем отчете он пишет: «…Некоторые башни и стены очень хорошие, всё же большая часть их в ближайшем будущем развалится сама собой… Яма лежит на реке Луге, которую, однако, можно перейти выше и ниже замка зимой и летом… Яма, по-видимому, не ремонтировалась с тех пор, как попала в руки шведской короны… Чем скорее, тем лучше сравнять с землей…». Впоследствии крепость обкладывается 40 бочками пороха и взрывается [11]. Шведы сохраняют только каменный четырехбашенный детинец.

В ходе Северной войны в 1703 г. шведский гарнизон «Ямбурхской» крепости после длительной осады сдается русским войскам без боя. Петр I планирует двигаться дальше на Нарву и принимает решение восстановить крепость на этой территории. Земляная бастионная крепость строится фактически заново, а древний каменный детинец снова приобретает значение внутренней цитадели (рисунок 3).

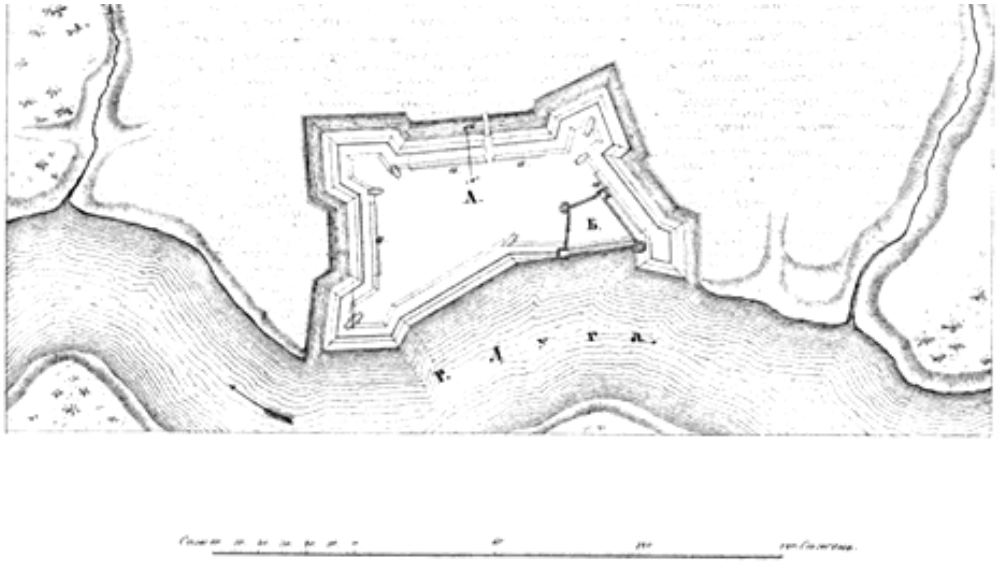


Рисунок 3. План крепости Ямбург. 1703 г. [12]
Figure 3. Plan of the Yamburg Fortress, 1703

Еще раз город перестраивается уже при Екатерине II. В это время крепость уже утрачивает фортификационное значение. Принимается решение провести перепланировку города, разобрать на строительный камень старую четырехбашенную крепость, срыть один из бастионов. На этом заканчивается история крепости Ям.

Впервые остатки древней крепости обнаруживают в 1909 г. при строительстве Коммерческого училища на берегу р. Луги (сейчас это городской краеведческий музей). В это время обнаружена кладка южной башни и расчищена направленная на восток амбразура. В 1971 г. в г. Кингисеппе впервые проводят археологические раскопки, которые показали полную сохранность нижних частей некогда существовавших там стен и башен [11]. Запрошенные из шведского королевского военного архива планы крепости подтверждены результатами археологических исследований.

Инженерно-геологические условия

При оценке влияния инженерно-геологических условий (ИГУ) на выбор нашими предками места для расположения оборонительного сооружения мы должны изучать роль рельефа, речной сети, геологического строения, гидрогеологических условий, проявлений экзогенных геологических процессов (ЭГП).

Согласно геологической карте четвертичных отложений масштаба 1:200000 (2021 г.) граница Балтийско-Ладожского глинта (структурно-денудационный уступ) пересекает р. Лугу на 2 км севернее крепости Ям. Копорье [8] и Ивангород, стоящие на краевой части глинта, между которыми находится Ям, использовали большие перепады высот (до 45 м) для повышения защищенности, однако в нашем районе глинт практически не выражен в рельефе, что ставит крепость скорее в один ряд со Старой Ладогой [2, 3], где основным фактором обороны становится река.

Защитной линией Яма является р. Луга. Выше крепости она имеет уклон 2,85 м/км, а в районе крепости и ниже нее – 0,58 м/км. Такая разница в уклонах также может говорить о прохождении рекой зоны глинта. Абсолютная отметка уреза реки у крепости чуть менее 3 м. Для русла реки характерно большое количество каменистых отмелей и перекатов, которые в старину использовались для проложения путей.

В ходе полевого обследования участка расположения крепости Ям было обнаружено, что в геологическом строении основания присутствуют исключительно ордовикские известняки (рисунок 4), что не читается на геологических картах масштаба 1:200 000 (2021 г.). Эти же известняки, очевидно, были использованы в качестве строительного материала крепости (рисунок 5). Такое размещение крепости было исключительно правильным выбором практически единственного места со скальным основанием для тяжелых оборонительных сооружений, так как на остальной территории преобладают верхнечетвертичные озерно-ледниковые песчано-гравийно-глинистые отложения.

А где же при таком геологическом строении тогда взяли достаточно большое количество строительного камня для возведения крепости? Можно предположить, что восточный пруд возник на месте карьера по добыче камня, так же, как и понижение с широким плоским дном, напоминающее ров и оконтуривающее крепость с юга, имеет техногенное происхождение. Подобный прием (добывать стройматериал, создавая одновременно защитный ров) использовался строителями Копорской (1237 г.) и Изборской (1330 г.) крепостей [8], он сокращал трудозатраты и увеличивал фортификационные преимущества, наращивая высоту стен за счет высоты стенки рва.



Рисунок 4. Обнажение известняков в основании руин крепости Ям в правом борту долины р. Луги (фото Стародубовой Ю. П. 16.11.2024)
Figure 4. Limestone outcrop at the base of the ruins of the Yam Fortress on the right bank of the Luga River valley (Photo by Yu. P. Starodubova, 16 November 2024)

В тектоническом отношении крепость Ям расположена в 2 км южнее Балтийско-Ладожского глинта, в зоне распространения которого развито большое количество разломов, изменивших условия залегания кембрийских и ордовикских отложений. Породы смещены по разломам вертикально и горизонтально с амплитудой до 5–10 м.

Полевое обследование участка расположения крепости показало, что она расположена на массиве известняков (предположительно ордовикских), который возвышается над рекой на 8–10 м, а над

окружающей территорией на 3–5 м. Больше нигде в ближайшей округе выходов известняков на таких отметках не наблюдается. Это позволяет предположить наличие останца, окруженного четвертичными образованиями. Но можно посмотреть на эту ситуацию иначе. Тогда придется допустить, что этот массив был приподнят на эти отметки тектоническими процессами.

Как это можно доказать? Вязкова О.Е. уже неоднократно для разных регионов Восточно-Европейской платформы анализировала связь тектонической трещиноватости пород с ориентировкой спрямленных участков речной сети (в разных масштабах) [8, 13, 14, 15]. Аналогичная работа была выполнена на начальном этапе анализа и для района расположения крепости Ям. В часто цитируемой работе Р. Зондера [16] выделено шесть систем планетарной трещиноватости (20°, 45°, 70°, 110°, 135°, 160–170°). Нашими исследованиями подтверждено наличие шести систем трещиноватости, но ориентировки их от региона к региону несколько изменяются. Так в Воронежской области отмечаются трещины с ориентировкой 10–20°, 40–45°, 70–80°, 90–100°, 140°, 160–170° [14], в соседней с Ленинградской Псковской области – 20°, 40–45°, 70°, 110°, 135°, 160° [13, 8]. В бассейне р. Луги в радиусе 5 км от крепости удалось выделить системы трещин с ориентировкой 30°, 60–65°, 80°, 120°, 140–145°, 170°.

а (a) б (b)



Рисунок 5. Бойница в нижней части юго-западной башни крепости Ям (а) и фрагмент кладки стены юго-западной башни (б) (фото Стародубовой Ю. П. 16.11.2024)

Figure 5. Embrasure in the lower part of the south-western tower of the Yam Fortress (a) and a fragment of the masonry of the south-western tower wall (b) (Photo by Yu. P. Starodubova, 16 November 2024)

На втором этапе авторы хотели проанализировать ориентировки прямолинейных участков Луги и ее притоков в радиусе 1 км от крепости и выяснить, были ли в рельефе проявлены в виде промоин региональные системы трещин и могли ли они послужить предопределяющими условиями для выбора именно этого участка для расположения крепости, а также ориентировки стен, обусловленной расположением оврагов, использованных нашими предками в качестве рвов. Частично подтверждения были найдены,

но проблема заключается в сильном техногенном изменении рельефа и отсутствии достоверных картографических материалов, на основе которых этот анализ мог быть выполнен.

Очень важным обстоятельством для функционирования крепостей является наличие постоянного источника водоснабжения, желательно внутри них. Восточный пруд (длина 225 м, максимальная ширина 35 м) расположен параллельно реке на расстоянии 150 м от русла, содержит чистую прозрачную воду, на его дне хорошо видна структура массива известняка. Дно пруда выше уровня воды в р. Луге на 5–7 м, но нигде на склонах при обследовании гидрогеологом (один из авторов) не было обнаружено выходов воды. Падение пород, согласно геологической структуре, идет в юго-восточном направлении, известняки имеют прослои глин. Очень вероятно, что питание пруда осуществляется не только с окружающей территории, но и со всей площади крепости. Слабая археологическая изученность не позволяет ответить на вопрос о наличии в крепости колодцев, но предполагать их наличие и обеспеченность водой мы можем.

Взаимодействия компонентов инженерно-геологических условий в ИПТС на протяжении истории ее функционирования очень влияли на ее сохранность.

Основание крепости относят к 1387 г. В это время (1350 г.) наступил малый ледниковый период (МЛП), который характеризуется похолоданием и активизацией физического выветривания. Это, видимо, сильно повлияло на условия строительства и эксплуатации крепостей, которые строились из известняка на известковом растворе.

При обсуждении влияния изменений климата на функционирование ИПТС возникает резонный вопрос. Почему первый детинец, построенный за 33 дня [11] простоял 400 лет и был разобран за ненадобностью по приказу Екатерины II, а вторая, пристроенная к нему крепость, пришла в аварийное состояние за 250 лет?

Одним климатом и процессами выветривания кладки здесь не ответить, условия у детинца и пристроя (обвода) были, казалось бы, одинаковыми, а сохранность разной. Тут можно предположить человеческий фактор – пристрой возводили другие люди, у которых, возможно, были несколько иные технологии, что не обеспечило должной долговечности.

Но, если внимательно посмотреть на расположение крепости, то станет заметно, что граница детинца и пристроенного обвода приходится на изгиб реки (рисунки 1–3), смену вектора течения. В таких местах активизируется процесс боковой эрозии водотока, что приводит к более интенсивному разрушению берега и склона. Можно предположить, что под стенами обвода произошли значительно более сильные разрушения массива пород, чем под детинцем, что и повлекло переход части стен в аварийное состояние.

По историческим сведениям, основной причиной разрушения крепости стали процессы, происходившие в кладке ее наземных конструкций, хотя и не по всей крепости. Инженерно-геологические условия участка, выбранного для строительства крепости, практически идеальны, по крайней мере, для участка детинца. Проблема исторически связана с тем, что необходимость в этой крепости не сохранялась долго у одних владельцев. Границы государств менялись так быстро и значительно в ходе многочисленных войн, что крепость оказывалась в глубине «своей» территории, и ее оборонное значение снижалось. При этом «хозяева» переставали проводить ремонт конструкций, и они разрушались эрозией и выветриванием во всех его проявлениях. Так за почти 100 лет шведского «владычества» при отсутствии вложений в ремонт большую часть более молодой крепости пришлось взорвать и разобрать.

Заключение

Авторам удалось выделить закономерности развития трещиноватости в известняках ордовика и влияние трещиноватости на форму крепости. Таким образом, доказана предопределенность, предзаданность планиграфии крепости и возможностей ее развития как оборонительного сооружения.

Влияние подземных вод было проявлено на стадии создания восточного пруда, служившего преградой, вдоль стены. В настоящее время не наблюдается водопроявлений вдоль берега р. Луги, хотя имеется длинный пруд, расположенный выше реки на 5–7 м, на расстоянии около 150 м. Это может быть обусловлено закономерностями залегания отложений ордовика, характеризующимися общим падением пород в юго-восточном направлении, то есть в сторону от реки.

Залегание пород стабилизирует склон со стороны реки, не позволяет интенсивно развиваться оползневым и обвальным процессам, особенно на участке расположения раннего детинца.

В целом массив пород, ставший основанием для первой крепости, был выбран исключительно грамотно и правильно. Никаких неприятностей он обитателям не доставлял. Сохранность и устойчивость крепости обеспечивалась и зависела исключительно от качества строительных материалов и работ. Аварийное состояние сооружений крепости предопределялось процессами, проходивших в конструкциях крепостных стен вдоль берегового обвода и, вероятно, это происходило на участке более интенсивного развития боковой эрозии Луги.

Литература / References

1. Вязкова О.Е. Инженерно-геологические аспекты возникновения и развития городища Камно // Археология и история Пскова и Псковской земли. Семинар имени академика В.В. Седова: Материалы 57-го заседания. Москва, Псков, 2011. С. 89−91.
   Vazkova O.E. Engineering-geological aspects of the origin and development of the Kamno hillfort. Archaeology and History of Pskov and the Pskov Land. V.V. Sedov Academic Seminar: Proceedings of the 57th Session. Moscow, Pskov, 2011. P. 89–91.
2. Вязкова О.Е., Дубровин К.А. Инженерно-геологические проблемы реконструкции восточной стены Староладожской крепости / Стратегия развития геологического исследования недр: настоящее и будущее (к 100-летию МГРИ–РГГРУ). [Текст]: материалы Международной научно-практической конференции / Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ–РГГРУ). В 2 т. Т. 2. /ред. Коллегия: В.А. Косьянов, В.В. Куликов, О.С. Брюховецкий. М.: Издательство НПП «Фильтроткани», 2018. С. 210–211.
   Vazkova O.E., Dubrovin K.A. Engineering-geological problems of the reconstruction of the eastern wall of the Staraya Ladoga Fortress. Strategy for the development of geological exploration of mineral resources: present and future (dedicated to the 100th anniversary of MGRI–RGGRU). [Text]: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. Sergo Ordzhonikidze Russian State University of Geological Exploration (MGRI–RGGRU). In 2 volumes. Vol. 2. Editorial Board: V.A. Kosyanov, V.V. Kulikov, O.S. Bryukhovetsky. Moscow: NPP "Filtrotkani" Publishing House, 2018. pp. 210–211.
3. Вязкова О.Е., Дубровин К.А. Инженерно-геологические проблемы музеефикации Староладожской крепости // Инженерные изыскания в строительстве. Материалы Четырнадцатой Общероссийской конференции изыскательских организаций. М.: ООО «Геомаркетинг». 2018. С. 528–533.
   Vazkova O.E., Dubrovin K.A. Engineering-geological problems of the museumification of the Staraya Ladoga Fortress. Engineering Surveys in Construction. Proceedings of the 14th All-Russian Conference of Surveying Organizations. Moscow: Geomarketing LLC, 2018. pp. 528–533.
4. Кирпичников А. Н. Каменные крепости Новгородской земли // Отв. ред. П. А. Раппопорт. Л.: Наука, Ленинградское отделение, 1984. 275 с.
   Kirpichnikov A.N. Stone fortresses of the Novgorod Land / Managing editor P.A. Rappoport. Leningrad: Nauka, Leningrad Branch, 1984. 275 p.

5. Дубровин К.А. Анализ инженерно-геологических принципов расположения крепостей Русского севера // Тезисы докладов XIV Международной научно-практической конференции «Новые идеи в науках о Земле. Развитие новых идей и тенденций в науках о Земле − гидрогеология и инженерная геология, геоэкология» М.: Изд-во Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе (МГРИ), 2019. Т. III. С. 111−114.
Dubrovin K.A. Analysis of engineering-geological principles for the location of fortresses in the Russian North. Abstracts of reports of the 14th International Scientific and Practical Conference «New Ideas in Earth Sciences. Development of new ideas and trends in Earth sciences – hydrogeology, engineering geology, geoecology». Moscow: Sergo Ordzhonikidze Russian State University of Geological Exploration (MGRI) Publishing House, 2019, vol. III, pp. 111–114.

6. Пашкин Е.М., Домарёв О.В., Никифоров А.А. Инженерно-геологический аспект проблемы сохранения древних оборонительных сооружений // Геоэкология. 1993. № 4. С. 117–125.
Pashkin E.M., Domarev O.V., Nikiforov A.A. Engineering-geological aspect of the problem of preserving ancient defensive structures. Geoecology, 1993, No. 4, pp. 117–125.

7. Пашкин Е.М. Инженерно-геологическая диагностика деформаций памятников архитектуры. СПб.: ПИ «Геореконструкция». 2013. 333 с.
Pashkin E.M. Engineering-geological diagnostics of deformations in architectural monuments. St. Petersburg: PI "Geo-reconstruction", 2013. 333 p.

8. Вязкова О.Е. Оценка влияния инженерно-геологических условий на строительство и эксплуатацию Изборской крепости // Археология и история Пскова и Псковской земли. Семинар имени академика В.В. Седова: Материалы 58-го заседания. − Москва, Псков, 2013. С.192–202.

9. Вязкова О.Е., Дубровин К.А. Инженерно-геологические причины и механизмы разрушения архитектурно-археологических памятников фортификационного назначения в различных условиях // Перспективы развития инженерных изысканий в Российской Федерации: мат-лы XV Общерос. науч.-практич. конф. изыскательских организаций. М.: Геомаркетинг, 2019. С. 459−464.

10. Кильдюшевский В. И. Новые исследования крепости Ям // Фортификация в древности и средневековье: Материалы методологического семинара. Памяти Игоря Николаевича Хлопина, Санкт-Петербург, 20–24 апреля 1995 года. Санкт-Петербург: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт истории материальной культуры Российской академии наук, 1995. С. 103−105. EDN AJBVCF.
Kildyushevsky V.I. New research on the Yam Fortress. Fortification in Antiquity and the Middle Ages: Proceedings of the Methodological Seminar. In memory of Igor Nikolaevich Khlopin, St. Petersburg, April 20–24, 1995. St. Petersburg: Institute for the History of Material Culture of the Russian Academy of Sciences (IHMC RAS), 1995, pp. 103–105. EDN AJBVCF.

11. Клеблеев Р.А., Вязкова О.Е. Анализ влияния трещиноватости на устойчивость бортов карьера «задонский» в Елецком районе Липецкой области // В сборнике: Новые идеи в науках о Земле. Материалы XV Международной научно-практической конференции. В 7-ми томах. Москва, 2021. С. 237–240.

12. Ласковский Ф.Ф. Карты, планы и чертежи к I, II частям материалов по истории инженерного искусства в России, СПб, 1858 г.

13. Вязкова О.Е. Опыт реконструкции инженерно-геологических условий на момент начального освоения территории древнего Пскова. Изв. ВУЗов. Геология и разведка, 2012. № 4. С. 47–51.
Vazkova O.E. Reconstruction of engineering-geological conditions at the time of initial development of the territory of ancient Pskov. Proceedings of Universities. Geology and Exploration, 2012, No. 4, pp. 47–51.

14. Вязкова О.Е., Еремина А.А. Влияние тектонической трещиноватости меловых пород на пространственные решения пещерных храмов (комплексов) юга Воронежской области //В сборнике: Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации. Материалы Семнадцатой Общероссийской научно-практической конференции и выставки изыскательских организаций. Москва, 2022. С. 472–477.
Vazkova O.E., Eremina A.A. Influence of tectonic jointing of Cretaceous rocks on the spatial solutions of cave temples (complexes) in the south of the Voronezh Region. Prospects for the development of engineering surveys in construction in the Russian Federation. Proceedings of the 17th All-Russian Scientific and Practical Conference and Exhibition of Surveying Organizations. Moscow, 2022. pp. 472–477.
15. Крепости Северо-Запада России: от крепости к крепости //Науч. ред. Ю. Б. Демиденко. СПб.: 2012. 294 с.
Fortresses of North-West Russia: from fortress to fortress / Scientific editor Yu.B. Demidenko. St. Petersburg, 2012. 294 p.
16. Sonder R.A. Die Lineamenttektonik und ihre Probleme. Ed Geol., Helv., 1938, vol.31, № 1, pp. 199–238.

Поступила в редакцию / Received 03.08.2026
Принята к публикации / Accepted 23.08.2026

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Вязкова Ольга Евгеньевна, доктор геолого-минералогических наук, профессор, Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, г. Москва, Россия, SPIN-код: 8597-3841, ORCID: 0000-0003-0927-3606, e-mail: wjask@yandex.ru.

Стародубова Юлия Павловна, научный сотрудник, Санкт-Петербургское отделение Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, г. Санкт-Петербург, Россия; SPIN-код: 8287-3010; j.starodubova@hgepro.ru.

Игнатов Петр Алексеевич, доктор геолого-минералогических наук, профессор, Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, г. Москва, Россия; SPIN-код: 7893-1477, ORCID: 0000-0002-7956-580X; e-mail: petrignatov@gmail.com.

Лаврусевич Иван Андреевич, кандидат технических наук, доцент, Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия; SPIN-код: 1750-0050; e-mail: 4914907@gmail.com.

Абенэ Алиса Игоревна, главный специалист, ООО Издательский центр «Академия», г. Москва, Россия; SPIN-код: 2387-6814; e-mail: alice.abene@gmail.com.

Обязов Виктор Афанасьевич, доктор географических наук, технический директор, ООО НПО «Гидротехпроект», г.Валдай, Россия; WoS ResearcherID: JBR-8590-2023, ORCID: 0000-0002-9644-1286; e-mail: td@npogtp.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Olga E. Vyazkova, D. Sc. (Geology and Mineralogy), Professor, Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia; SPIN-code: 8597-3841, ORCID: 0000-0003-0927-3606; e-mail: wjask@yandex.ru.

Yulia P. Starodubova, Research Scientist, St. Petersburg Branch of the Institute of Geoecology named after E.M. Sergeev, Russian Academy of Sciences (RAS), St. Petersburg, Russia; SPIN-code: 8287-3010; j.starodubova@hgepro.ru.

Pyotr A. Ignatov, D. Sc. (Geology and Mineralogy), Professor, Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia; SPIN-code: 7893-1477, ORCID: 0000-0002-7956-580X; e-mail: petrignatov@gmail.com**.**

Ivan A. Lavrusevich, Ph. D. (Technical), Docent, Moscow State Construction University, Moscow, Russia; SPIN-code: 1750-0050; e-mail: 4914907@gmail.com.

Alisa I. Abene, Leading Specialist, Publishing Center «Akademia» LLC, Moscow, Russia; SPIN-code: 2387-6814; e-mail: alice.abene@gmail.com.

Viktor A. Obyazov, D. Sc. (Geography), Technical Director, NPO "Gidrotekhproekt", Valday, Russia; WoS ResearcherID: JBR-8590-2023, ORCID: 0000-0002-9644-1286; e-mail: td@npogtp.ru.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

В научный журнал «Гидросфера. Опасные процессы и явления» принимаются статьи на русском и английском языках в соответствии с основными тематическими разделами:

1. Фундаментальные проблемы гидросферы Земли
2. Опасные процессы в гидросфере: фундаментальные и инженерные аспекты
3. Эволюция гидросферы
4. Экологические проблемы и опасности в гидросфере
5. Методы, модели и технологии
6. Вопросы совершенствования нормативной документации
7. Гидрологический режим водных объектов
8. Мониторинговые, экспериментальные и экспедиционные исследования
9. Глобальные и региональные изменения природы и климата
10. Научные дискуссии
11. Наследие
12. Новости. События. Информация

Плата за публикации статей не взымается. Гонорар авторам не выплачивается. Все статьи после формирования выпуска размещаются на сайте журнала в свободном доступе.

Общие требования к оформлению статьи:

- формат **.doc** или **.docx**; все поля страницы – по 2 см;
- шрифт Times New Roman, размер – 11 pt;
- междустрочный интервал – множитель 1,15, переносы в словах не допускаются;
- абзацный отступ – 1 см, выравнивание текста – по ширине (за исключением титульной страницы, формул, сносок, рисунков и таблиц).

Титульная страница должна содержать следующие элементы:

- УДК (выравнивание по левому краю);
- название статьи (регистр как в предложении, выравнивание по центру) не более 14 слов;
- инициалы и фамилия автора (авторов) (выравнивание по центру);
- полное название организации, в которой работают авторы, с указанием города и страны (курсив, выравнивание по центру);
- e-mail контактного автора (выравнивание по центру);
- аннотация объемом 230-250 слов, которая должна включать актуальность темы исследования, постановку проблемы, цели исследования, методы исследования, результаты и ключевые выводы;
- ключевые слова – 6-10 слов, предельно отражающих предмет исследования.

При подготовке статьи редакция настоятельно рекомендует придерживаться формата **IMRAD**, подразумевающего структурирование статьи на следующие элементы:

- введение (Introduction), содержащпй актуальность исследования, обзор литературы, постановку проблемы, формулирование целей и задач исследования;
- методы (Methods), содержащий описание методики (методов) и схем экспериментов/наблюдений, материалов, приборов, оборудования и условий экспериментов/наблюдений;
- результаты (Results) – фактические результаты исследования и их интерпретация;
- обсуждение (Discussion) – краткие итоги разделов статьи без дословного повторения.

Таблицы и рисунки оформляются без абзацного отступа с выравниванием по центру, отделяются пустыми строками от основного текста. Все рисунки должны быть максимального качества. В таблицах допускается использование одинарного междустрочного интервала, шрифта меньшего размера (не менее 10 pt). Каждая таблица и рисунок должны иметь номер (используются арабские цифры) и название. Все подписи к таблицам и рисункам должны содержать источники информации (за исключением случаев, когда они созданы автором статьи).

Единицы измерения по тексту статьи указываются в международной системе единиц.

Десятичные числа набираются через запятую (например, 1,25).

Аббревиатуры и сокращения должны быть расшифрованы при первом употреблении. Если таких элементов много, статью можно дополнить списком сокращений с расшифровкой.

Формулы должны быть вставлены как объект Microsoft Equation или набраны в редакторе формуле Word, располагаться по центру страницы без абзацного отступа, сопровождаться сквозной нумерацией (по правому краю), а также иметь экспликацию (расшифровку обозначений при первом их упоминании с указанием единиц измерения).

В конце статьи могут быть приведены **Благодарности**, в котором следует упоминать людей, которые помогали при работе над статьей; источники финансирования. Данный раздел должен приводится на русском и английском языках.

Цитированная литература приводится общим списком (без разделения русский и английский языки) по мере упоминания, ссылки в тексте даются порядковым номером в квадратных скобках (напр., [1]). Для источников, опубликованных на русском языке и имеющих частичный перевод на английский язык (выходные данные, аннотация), цитирование приводится сначала на языке оригинала, потом перевод на английский. Для источников, не имеющих хотя бы частичного перевода на русский язык, приводится только ссылка на исходный источник (без перевода и транслитерации). При наличии переводной версии публикации она приводится со своими выходными данными. Литература полностью на английском языке приводится только в оригинале.

Форматы оформления основных видов затекстовых библиографических ссылок:

Книга: Фамилия И.О. Заглавие книги: Сведения, относящиеся к заглавию книги / Сведения об ответственности (например, редактор). Место издания (город): Издательство, год. Количество страниц в книге. DOI (при наличии).

Пример: Дмитриев В.В., Ярг Л.А. Методы и качество лабораторного изучения грунтов: учебное пособие. М.: КДУ, 2008, 542 с.

Новосельцева А.И., Смирнов Н.А. Справочник по лесным питомникам. М.: Лесн. пром-сть, 1983. 280 с.

Novoseltseva A. I., Smirnov N. A. Handbook of forest nurseries. M.: Lesn. prom-st, 1983. 280 p.

Диссертация или автореферат: Фамилия И.О. Заглавие диссертации. Тип диссертации. Место издания (город), год. Количество страниц в диссертации. DOI (при наличии).

Пример: Казаков Н.А. Геологические и ландшафтные критерии оценки лавинной и селевой опасности при строительстве линейных сооружений (на примере о. Сахалин). Дисс. … канд. геол.-мин. наук. Южно-Сахалинск, 2000. 216 с.

Kazakov N.A. Geological and landscape criteria for assessing avalanche and debris flow hazard during the construction of linear structures (on the example of Sakhalin Island). Ph. D. (Geological and mineralogical sciences) Thesis]. Moscow, 2000. 216 p. (In Russian; abstract in English).

Статья/раздел в книге: Фамилия И.О. Заглавие статьи // Заглавие книги: Сведения, относящиеся к заглавию книги / Сведения об ответственности. Место издания (город): Издательство, год издания. Страницы статьи. DOI (при наличии).

Пример: Кириллова В.А. Характеристика притоков озера // Кубенское озеро: Материалы комплексных исследований / Отв. ред. Т.И. Малинина, И.М. Распопов. Л.: Наука, 1974. С. 9–11.

Durand P., Breuer L., Johnes P.J. Nitrogen processes in aquatic ecosystems. In: Sutton M.A., Howard C.M., Erisman J.W. et al. (eds.), The European Nitrogen Assessment: Sources, Effects and Policy Perspectives. Cambridge University Press; 2011. P. 126–146.

Статья в периодическом издании: Фамилия И.О. Заглавие статьи // Заглавие журнала. Год. Том. №. Страницы статьи. DOI (при наличии).

Пример: Виноградов А.Ю., Обязов В.А. Об аппроксимации зависимости сопротивления грунта сдвигу от нормального давления // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2023. Т. 5. Вып. 3. С. 283–291. DOI: 10.34753/HS.2023.5.3.256.

Vinogradov A. Yu., Obyazov V. A. About the approximation of the dependence of soil shear resistance on normal pressure. Hydrosphere. Hazard processes and phenomena. 2023, vol. 5, iss. 3, pp. 256–263. (In Russian; abstract in English). DOI:10.34753/HS.2023.5.3.256.

Материалы в сборнике конференции: Фамилия И.О. Заглавие статьи // Заглавие сборника конференции: Сведения, относящиеся к заглавию сборника (место и даты проведения конференции). Место издания (город): Издательство, год. Том. Страницы статьи. DOI (при наличии).

Пример: Кириченко Л. А. Исследование эколого-рекреационной значимости некоторых водоемов г. Бреста // Перспективные методы очистки природных и сточных вод: сб. ст. регион. науч.-тех. конф., Брест, 26 сент. 2019 г. / Министерство образования Респ. Беларусь, Брест. гос. техн. ун-т, Кафедра водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов; редкол.: С. Г. Белов [и др.]. Брест: БрГТУ, 2019. С. 68–71.

Bulgakova E.V., Nefed'eva E.E. Causes of seed hardness and ways of its overcoming on the example of the seed of honey locust (Gleditsia triacanthos) In: International Forum on Chemical, Biological, Agricultural, Pharmacy and Health Sciences (Madrid, Spain), May 31th, 2017: conference proceedings. Madrid, 2017, pp. 17–22.

Электронный источник: Фамилия И.О. Заглавие материала [Электронный ресурс]: сведения, относящиеся к заглавию // Заглавие интернет-источника. Год создания ресурса. URL: адрес статьи (дата обращения: ДД.ММ.ГГГГ).

Пример: Рупышев В. Обзор потребительского рынка полистирола России и СНГ [Электронный ресурс] // The Chemical Journal. 2013. URL: https://tcj.ru/wp-content/uploads/2013/12/2006_1_46-53.pdf. (дата обращения: 10.01.2025).

В затекстовые библиографические ссылки включаются только рецензируемые источники (статьи из научных журналов, материалы конференций, разделы книг и книги). Если необходимо сослаться на нормативный документ либо на статью в газете, текст на сайте или в блоге, следует поместить информацию об источнике в сноску по основному тексту статьи. **Сноски** оформляются сквозной нумерацией по всему документу арабскими цифрами. В сносках помимо источников может быть другая дополнительная информация. Текст в сносках оформляется без абзацного отступа, выравнивается по ширине, размер шрифта – 9 pt.

Кроме того, обязательно подается **авторская справка**, содержащая информацию обо всех авторах: фамилия, имя, отчество (полностью); ученые степень и звания; место работы с указанием должности; контактный телефон; e-mail; авторские индексы.

На **английском языке** в обязательном порядке приводятся: титульная страница; названия таблиц и рисунков; благодарности (при наличии); литература (оформляется по требованиям, изложенным выше); авторская справка. При этом англоязычный вариант аннотации (**Abstract**) должен быть информативным (не содержать общих слов); оригинальным (не быть калькой русскоязычной аннотации); содержательным (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); структурированным (следовать логике описания результатов в статье); «англоязычными» (написаны качественным английским языком); компактным (укладываться в объем до 250 слов).

Подробные правила приведены http://hydro-sphere.ru/index.php/hydrosphere/requirements.

AUTHOR GUIDELINES

Articles in Russian and English accepted at the journal "Hydrosphere. Hazard processes and phenomena" in accordance with the main sections:

1. Fundamental problems of the Earth's hydrosphere
2. Hazardous processes in the hydrosphere: fundamental and engineering aspects
3. The evolution of the hydrosphere
4. Ecological problems and hazards in the hydrosphere
5. Methods, models and technologies
6. Issues of improving regulatory documentation
7. Hydrological regime of water objects
8. Monitoring, experimental and expeditionary research
9. Global and regional changes of nature and climate
10. Scientific discussions
11. Heritage
12. News. Events. Information

There is no fee for publishing articles. The authors are not paid a fee.

All articles after the formation of the issue are posted on the journal's website in the public domain. Materials published in journal are freely available and posted on the journal website.

The general format requirements for articles to be published:

- file format .doc or .docx; fields 2 cm on the perimeter of the page;
- font Times New Roman, the main font size – 11 pt;
- line spacing – 1,15, the use of automatic hyphenation in words is not permitted;
- indent – 1 cm, text alignment on the page width (except for the title page, formulas, links, figures and tables).

The title page should contain the following elements:

- title of the article (register as in the sentence, alignment in the centre) no more than 14 words;
- author (s)' name (alignment in the centre);
- organization affiliation, indicating the city and country (in italics, alignment in the centre);
- e-mail of the contact author (center alignment);
- abstract up to 250 words, which should include the relevance of the research topic, problem statement, research objectives, research methods, results and key findings;
- keywords – 6-10 words, reflecting the content of an article.

The main text.

The editors strongly recommend original research articles are structured in IMRAD format:

Introduction – Why was the study undertaken? What was the research question, the tested hypothesis or the purpose of the research?

Methods – When, where, and how was the study done? What materials were used or who was included in the study groups (patients, etc.)?

Results – What answer was found to the research question; what did the study find? Was the tested hypothesis true?

Discussion – What might the answer imply and why does it matter? How does it fit in with what other researchers have found? What are the perspectives for future research?

Tables and figures should be centered on page without indentation, separated from the main text by empty lines. All figuries should be in highest quality. There are allowed of using a single line spacing, and a smaller font (no less 10 pt) in tables. Each table and figure should have a number and a title. All signatures to tables and figures should contain sources of information (except when they are created by the author of the curent article).

Units of measurement in the text of the article are indicated in the international system of units.

Decimal numbers are comma-separated (e.g. 1,25).

Abbreviations should be defined at first mention and used consistently thereafter. If there are a lot of abbreviations, the article can be supplemented by a section with a list of abbreviations with decryption.

For equations use a Microsoft Equation object or Word equation editor, they should be located in the center of the page without indentation and accompanied by continuous numbering (on the right edge). All equations must have an explication (defining of symbols at the first mention of them with units measurements).

If it necessary **Acknowledgments** of people, grants, funds, etc. should be placed in a separate section before the reference list. The names of funding organizations should be written in full.

Footnotes can be used to give additional information, which may include the citation of a reference included in the reference list. Footnotes to the text are numbered consecutively.

Cite references is listed in a single general list as it is mentioned in the text, with references in the text given by sequential numbers in square brackets (e.g., [1]). For sources published in Russian and having a partial translation into English (publication details, abstract), the citation is given in two languages (first the original, then the English translation) with an indication of the original language. For sources that do not have at least a partial translation into Russian, only the reference to the original source is given (without translation or transliteration).

References list should only include works that are cited in the text and that have been published or accepted for publication. Personal communications and unpublished works should be mentioned in the footnotes. Reference list should be alphabetized by the last names of the first author. If you use several references of author.

Some formats for references list:

Book reference: Author A.A. Title of book. City, Publisher, year. 100 p. DOI:

Book chapter reference: Author A.A. Title of chapter. In Editor E.E. (ed.), Title of book. City, Publisher, year, P. 1–20. DOI:

Dissertation reference: Author A.A. Title of thesis. Thesis type. City, year. 100 p. DOI:

Jornal article reference: Author A.A., Author B.B., Author C.C., Author D.D. Title of article. Title of Journal, 2005, vol. 10, no. 2, pp. 49–53. DOI:

Conference Proceedings reference: Author A.A., Author B.B., Author C.C., Author D.D. Title of article. In: Title of Conference Proceedings (date and place of the conference), City, Publisher, 2005, vol. 1, pp. 49–53. DOI:

Online document reference: Author A.A., Author B.B., Author C.C., Author D.D. Title of article. Title of Journal, 2005, vol.10, no. 2, pp. 49–53. Available at: http://example.com/example.

For the detailed information about the author(s), please at the end of article give us some additional information:

full names of author(s);
academic degree and title;
organization affiliation with full address (including Post Code);
position in organization;
contact telefon (for all authors);
contact e-mail (for all authors);
scientific indexes (scopus, orcid, web of science etc.).

Detailed rules for articles will be given on the website of the journal "Hydrosphere. Hazard processes and phenomena": http://hydro-sphere.ru/index.php/hydrosphere/requirements.

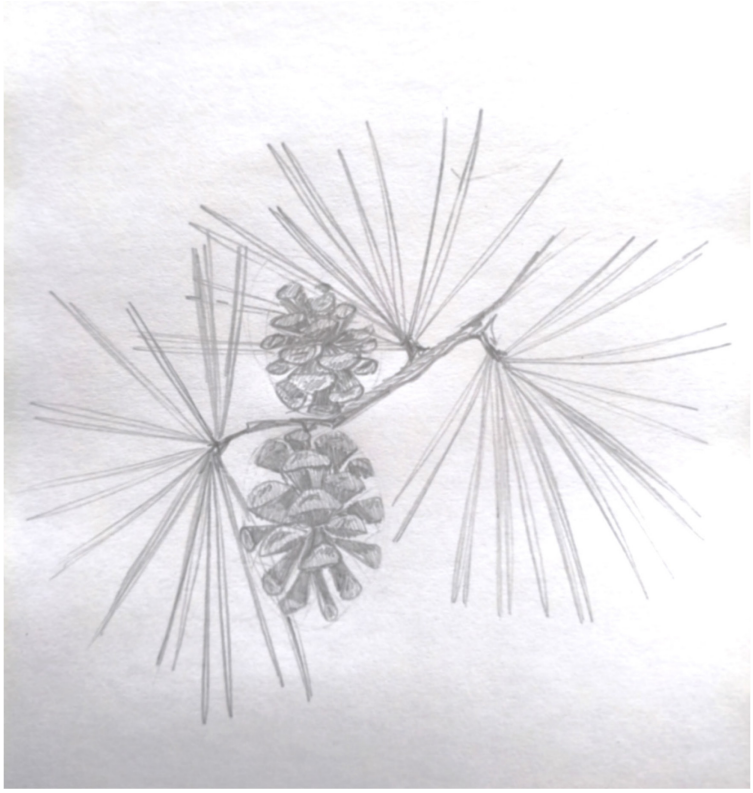
Научное издание

ГИДРОСФЕРА. ОПАСНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ. HYDROSPHERE. HAZARD PROCESSES AND PHENOMENA (GIDROSFERA. OPASNYE PROTSESSY I YAVLENIYA)

Главный редактор: академик РАН Г.И. Долгих
Компьютерная верстка: О.Ю. Круковская
На обложке фото В.А. Обязова,
рисунки О.Ю.Круковской
Подписано в печать 01.10.2026. Формат: 60x84/8
Бумага: офсетная. Печать плоская Усл. печ. л. 19,2. Тираж 50 экз. Заказ № ____
Выход в свет 05.10.2026
Тип распространения: бесплатно на сайте журнала www.hydro-sphere.ru

Издатель: ООО НПО «Гидротехпроект», г. Санкт-Петербург, ул. Кораблестроителей, д. 34, лит. А, пом. 21-Н
Для почтовых отправлений: 199058, г. Санкт-Петербург, ул. Кораблестроителей, д. 34, лит. А,
пом. 21-Н, ООО НПО «Гидротехпроект»
Редакция журнала «Гидросфера. Опасные процессы и явления»
Тел. +7(812)313-83-48 e-mail: info@hydro-sphere.ru

Отпечатано с оригинал-макета заказчика в ООО «Цифрофсет»,
г. Санкт-Петербург г., 5-я линия В.О., 70, А, 52/52Н





© 2026. «Гидросфера. Опасные процессы и явления». Все права защищены