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

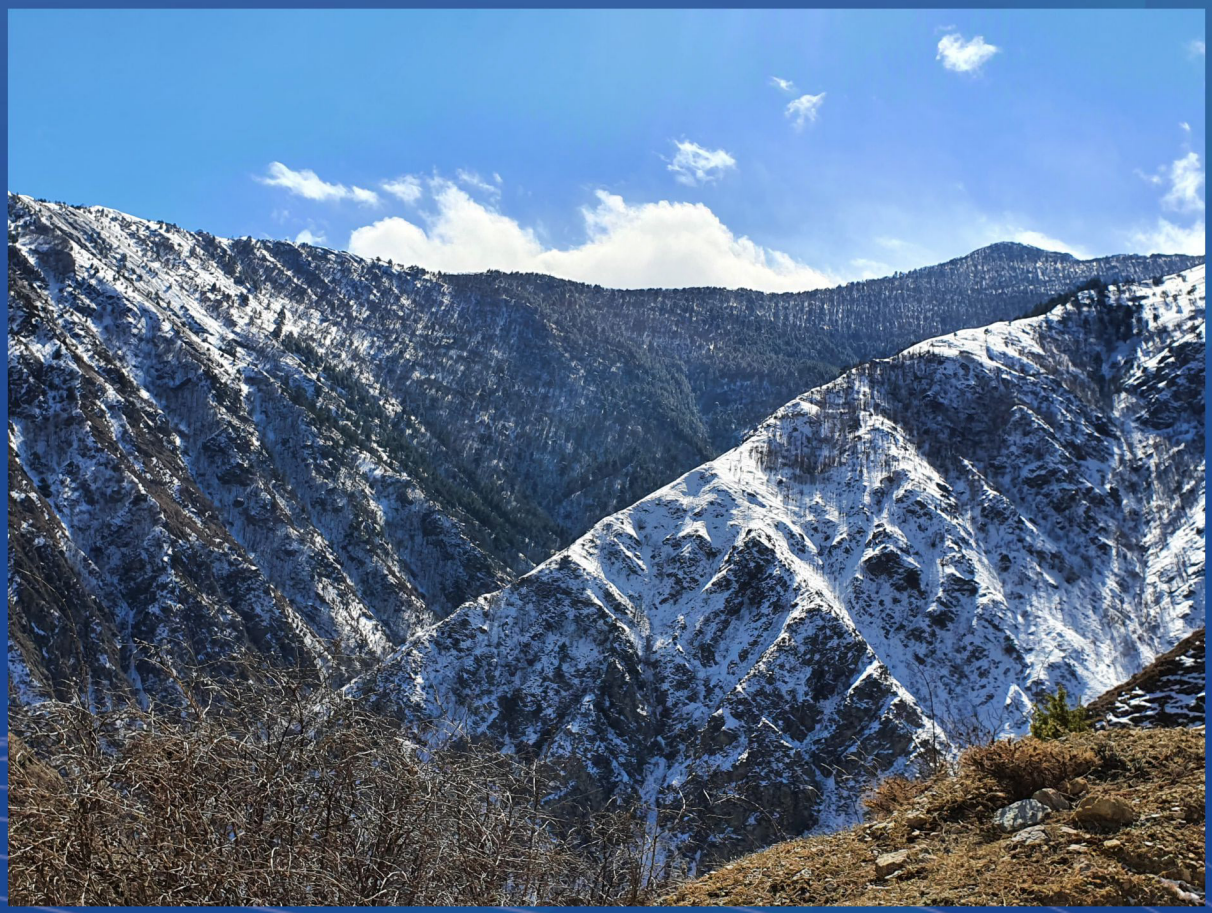
ГИДРОСФЕРА

ОПАСНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ

HYDROSPHERE

HAZARD PROCESSES AND PHENOMENA

www.hydro-sphere.ru



2025 Том 7 Выпуск 4



ГИДРОСФЕРА. ОПАСНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ

Том 7, Выпуск 4

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 7, Issue 4

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:
199058 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:
199058, 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

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ 322

Типизация индекса условий замерзания на реках Кольского полуострова Л. С. Банщикова, С.А. Канашин 322

Факторы многолетних колебаний водности трансграничного озера Ханка (юг Дальнего Востока России) Р.С. Шайгузов, В.В. Шамов, С.Ю. Лупаков 333

Оценка современных изменений сроков физической навигации на реке Лена М. С. Дрегваль, Е.В. Гайдукова, А.А. Батмазова, И.О. Винокуров 355

МЕТОДЫ, МОДЕЛИ И ТЕХНОЛОГИИ 367

Методы моделирования и прогнозирования процесса переработки берегов существующих водохранилищ М.В. Степанова, В.Н. Экзарьян 367

Оценка величины относительной тангенциальной деформации А.Ю. Виноградов, В.А. Обязов, А.С. Войтенко, Г.П. Романов 380

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ И ОПАСНОСТИ В ГИДРОСФЕРЕ 390

Перспективы применения в курортной отрасли природных гидроминеральных ресурсов соленых озер южной части Херсонской области А.А. Турченко, С.Г. Запускалов, В.В. Чабан, Н.В. Гуськова 390

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ 399

CONTENTS

HYDROLOGICAL REGIME OF WATER OBJECTS 322

Typing of the Freezing Conditions Index for Rivers on the Kola Peninsula Lyubov S. Banshchikova., Sergey A. Kanashin 322

Factors of Long-Term Water Level Fluctuations in the Transboundary Khanka Lake (the South of the Russian Far East) Ruslan S. Shaiguzov, Vladimir V. Shamov, Sergey Yu. Lupakov 333

Assessment of Modern Changes in the Navigation Season Timing on the Lena River Maria S. Dregval, Ekaterina V. Gaidukova, Anna A. Batmazova, Igor O. Vinokurov 355

METHODS, MODELS AND TECHNOLOGIES 367

Methods for Modeling and Forecasting Shoreline Erosion in Existing Reservoirs Maria V. Stepanova, Vladimir N. Ekzaryan 367

Evaluation of the Relative Tangential Deformation Value Alexey Yu. Vinogradov, Victor A. Obyazov, Andrey S. Voitenko, Georgiy P. Romanov 380

ECOLOGICAL PROBLEMS AND HAZARDS IN THE HYDROSPHERE 390

Prospects for the Use of Natural Hydro-Mineral Resources of Salt Lakes in the Southern Part of the Kherson Region in the Resort Industry Alexey A. Turchenko, Sergey G. Zapuskalov, Viktor V. Chaban, Natalia V. Guskova 390

AUTHORS GUIDELINE 399

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ
HYDROLOGICAL REGIME OF WATER OBJECTS

Научная статья / Scientific paper
УДК: 556.535.5, 551.583
DOI: 10.34753/HS.2025.7.4.322

Типизация индекса условий замерзания на реках Кольского полуострова

Л. С. Банщикова, С.А. Канашин
Государственный гидрологический институт, г. Санкт-Петербург, Россия
e-mail: ckanashin@yandex.ru

Аннотация. Разработан индекс условий замерзания (ИУЗ), характеризующий условия появления льда и установления ледостава на реках Кольского полуострова и основанный на накопленных суммах отрицательной температуры воздуха с октября по январь. Исследование выполнено по данным 40 метеостанций за период 1841–2024 гг. и характеристикам ледового режима 23 гидрологических постов за 1929–2020 гг. Для восстановления пропусков в температурных рядах использованы методы множественной регрессии с использованием однородных рядов. На основе средних значений сумм температуры воздуха холодного сезона выделены однородные по термическому режиму районы и построены карты распределения ИУЗ. Показано, что в среднем по территории индекс условий замерзания в октябре изменился несущественно, тогда как в ноябре, декабре и январе наблюдаются статистически значимые положительные тренды, свидетельствующие об ослаблении суровости замерзания. Разработана типизация ИУЗ по трем градациям суровости (тёплый, умеренный, холодный месяц), в результате чего получено 19 типов сочетаний условий замерзания за сезон. Для каждого типа выполнен сопоставительный анализ динамики накопления отрицательных температур и соответствующих видов ледовых явлений, что позволило установить характерные комплексы первичных ледовых явлений, неполного и сплошного ледостава. Показано, что холодные типы ИУЗ преобладали до 1930-х годов, тогда как в конце XX – начале XXI вв. возрастает доля мягких и умеренных типов. Полученные результаты могут быть использованы при уточнении региональных прогностических зависимостей сроков появления первичных ледовых явлений и установления ледостава, а также при оценке последствий продолжающегося климатического потепления для речных экосистем и водохозяйственной деятельности.

Ключевые слова: Кольский полуостров; изменение климата; ледовый режим; индекс условий замерзания; накопление сумм отрицательных температур.

Для цитирования: Банщикова Л. С., Канашин С.А. Типизация индекса условий замерзания на реках Кольского полуострова // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2025. Т. 7. Вып. 4. С. 322–332. DOI: 10.34753/HS.2025.7.4.332.

Typing of the Freezing Conditions Index for Rivers on the Kola Peninsula

Lyubov S. Banshchikova, Sergey A. Kanashin
State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia
e-mail: ckanashin@yandex.ru

Abstract. This study develops a Freezing Conditions Index (FCI) that characterizes the conditions for initial ice formation and the establishment of stable ice cover on rivers of the Kola Peninsula. The index is based on accumulated negative sums of mean monthly air temperature from October to January. We use air temperature records from 40 meteorological stations for 1841–2024 together with ice-regime characteristics from 23 hydrological gauging stations for 1929–2020. Missing values in the temperature series are reconstructed by multiple regression using homogeneous reference series. Using mean cold-season temperature sums, we delineate thermally homogeneous regions and construct maps of the spatial distribution of the FCI. The area-averaged FCI for October shows only minor changes, whereas November, December and January exhibit statistically significant positive trends, indicating a weakening of freezing severity. We classify monthly FCI values into three grades (mild,

moderate and cold months), which results in 19 recurrent seasonal combinations of freezing conditions. For each seasonal type, we perform a comparative analysis of the dynamics of negative temperature sums and the corresponding sets of ice phenomena, and consequently identify characteristic complexes of primary ice formation, incomplete freeze-up and complete freeze-up. Cold FCI types dominate up to the 1930s, while in the late twentieth and early twenty-first centuries the share of mild and moderate types increases. As a result, the proposed index provides a physically based tool for refining regional prediction schemes of the timing of primary ice appearance and freeze-up, and for assessing the impacts of ongoing climate warming on river ecosystems and water-management activities.

Keywords: Kola Peninsula; climate change; ice regime; freezing conditions index; accumulation of negative temperature sums.

For citation: Banshchikova L. S., Kanashin S.A. Typification of the Freezing Conditions Index for Rivers on the Kola Peninsula. Hydrosphere. Hazard processes and phenomena, 2025, vol. 7, iss. 4, pp. 322–332. DOI: 10.34753/HS. 2025.7.4.322. (In Russian; abstract in English).

Введение

Ледовый режим рек и озер, как совокупность закономерно повторяющихся процессов возникновения, развития и разрушения ледяных образований [1], является неотъемлемой частью гидрологического цикла. Для возникновения первых ядер кристаллизации достаточно переохлаждение поверхности воды до 0 °С, дальнейшие же формирования различного вида первичных ледовых явлении – сала, заберегов, шуги и ледостава их продолжительность и сроки появления, вариативность, во многом зависит от условий накопления сумм отрицательных температур.

Согласно Р.В. Донченко [2], длительность установления первичных ледовых явлений и ледостава определяется отношением отдачи тепла с поверхности воды в атмосферу и интенсивностью ее турбулентного перемешивания. Для рек Кольского полуострова характерно чередование озерных и равнинных участков рек, для которых переохлаждение воды с образованием льда происходит преимущественно в поверхностном слое, на горных же участках перемешивание водных масс происходит по всей глубине по всей глубине.

Согласно анализу данных наблюдений за ледовыми явлениями на реках Кольского полуострова за период инструментальных наблюдений, с 1936 по 2020 год вне зависимости от вида участка реки, время появления первичных ледовых явлений составляет не более нескольких суток, при этом в большей степени меняются именно виды ледовых явлений, но не срок их появления внутри одного гидрологического года [3].

Вопросу изменчивости условий формирования и сроков установления ледовых явлений за период инструментальных измерении на реках Кольского полуострова посвящено много работ [4–9]. Во всех указанных выше работах основным фактором, влияющим на сроки появления первичных ледовых явлений выделена температура воздуха

В работах [10–18] приведён анализ климатических тенденции на Кольском полуострове за период инструментальных метеорологических измерений как за современный период, так и за период с 1840 г. Выявлено, что за счет роста весенних и осенних температур произошло сокращение зимнего периода. Температура воздуха периода отрицательных температур достигла своих максимальных значений в 1930-е годы, затем снизились, а с 1980-х гг., началось потепление, которое наиболее интенсивно наблюдается в последние 40–50 лет, но не превысили уровня предыдущего потепления.

Учитывая тесную связь между сроками появления ледовых явлений и ледостава с суммами отрицательных температур в работе выполнен анализ условий замерзания для рек Кольского полуострова за период с 1841 г.

Учет многолетней пространственно-временной изменчивости ледового режима, в том числе сроков установления первичных ледовых явлений и ледостава, позволит существенно улучшить критерии прогнозных зависимостей.

В настоящее время в предзимний период на исследуемой территории наблюдается чередование волн тепла и холода, что обусловливает прерывистое ледообразование. Наряду с этим, также наблюдаются и годы с дружным осенним ледообразованием. Неустойчивость ледовых явлений существенно затрудняет разработку региональных прогностических зависимостей.

Таким образом, целью работы является оценка изменчивости условий формирования первичных ледовых явлений и ледостава и разработка типизации ледового режима периода замерзания за многолетний период для дальнейшей верификации прогнозных зависимостей.

Материалы и методы

Для типизации условий замерзания была собрана база данных характеристик ледового режима рек Кольского полуострова, включающая ежедневные виды ледовых явлений со дня их появления до даты установления устойчивого ледостава по 23 гидрологическим постам за период с 1929 по 2020 гг.[1] и по 40 метеостанциям за период с 1840 по 2024 гг., среднемесячные температуры воздуха и ежедневные температуры воздуха за отдельные годы.

Для приведения к общему многолетнему периоду с 1841 до 2024 гг. по данным, полученным за совместный период наблюдений, методом множественной регрессии были восстановлены значения среднемесячных температур воздуха за октябрь-декабрь в отсутствующие годы по их значениям на станции-аналоге. Уравнение составлялось при условии выполнения установленных критериев [19]: $n \geq 6–10$, $r \geq r_{кр}$, $k/\sigma k \geq r_{кр}$, где n – число лет с параллельными наблюдениями, r – коэффициент парной или множественной корреляции между значениями метеорологической величины в приводимом пункте и их значениями в пункте-аналоге; $r_{кр}$ – критическое значение коэффициента корреляции ($\geq 0{,}7$); k – коэффициент уравнения регрессии, σ_k – его средняя Однородность рядов оценена при помощи критериев Стьюдента и Фишера. Для оценки линейных трендов использовался критерий значимости выборочного коэффициента корреляции R. Гипотеза об отсутствии тренда не опровергалась при уровне значимости $2\alpha = 5$ %, если выполнялось условие $|r| \geq 0{,}7$. Однородные районы определены методом k-means по средней температуре воздуха за холодный сезон, оценка статистической значимости различия средних значений выполнялась исходя из критерия Стьюдента при уровне значимости $2\alpha = 5$ %.

В работе был разработан индекс условий замерзания – $i_{уз}$, расчет которого обоснован на подходе, аналогичном определению показателя суммы градусо-дней [20, 21].

ИУЗ рассчитывается как сумма отрицательных температур за рассматриваемый период для каждой метеостанции:

$$i_{\text{уз}} = \sum(-t_{\text{ср. сут.}}) \qquad (1)$$

В качестве исходных данных использованы суммы среднемесячных отрицательных значений температуры воздуха за период (октябрь–декабрь) по всем метеостанциям. Для градации на суровые умеренные и теплые месяца (периоды) наибольшие отклонения от средней многолетней суммы температур за период формирования ледовых явлений, как в сторону максимальных, так и в сторону минимальных поделены на три части за каждый месяц. Градация выполнена по следующему алгоритму: расчет сумм отрицательных температур за период, расчет среднемноголетнего, максимального и минимального значения, предельные пороговые значения. Данный алгоритм является универсальным и может быть применён и для других регионов.

В зависимости от сочетания последовательности условий замерзания за

[1] Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2025622437 «Многолетние гидрометеорологические характеристики ледового режима рек и озер Кольского полуострова». Правообладатель: ФГБУ «Государственный гидрологический институт». Авторы: Канашин С.А., Банщикова Л.С. заявл. 19.05.2025 г., опубл. 03.06.2025 г.

каждый месяц значения сумм отрицательных температур по месяцам (индекс условии замерзания) за период с 1841 по 2024 гг. были ранжированы, а затем отнесены соответствующему классу: от I (все месяцы теплые) до XX (все месяцы холодные). Далее для каждого типа выбраны наиболее характерные года, для которых выполнен совместный анализ накопления сумм отрицательных температур и ледовых явлений за каждый день за период с 1 октября до 31 января.

Обсуждение результатов

По всем метеостанциям за многолетний период с 1841 по 2024 гг. прослеживается общий положительный тренд, при этом внутри общего периода можно выделить как два холодных (отрицательные тренды) 1841–1868 гг., так и года с экстремальными минимальными и максимальными значениями индексов условий замерзания (рисунок 1, таблица 1). В расчетный период индексов условий замерзания включены и суммы отрицательных температур за октябрь. Наблюдаемые в этом месяцы среднесуточное температуры воздуха немногим ниже нуля. Этих значений достаточно для начала переохлаждения воды и формировании первичных ядер кристаллизации.

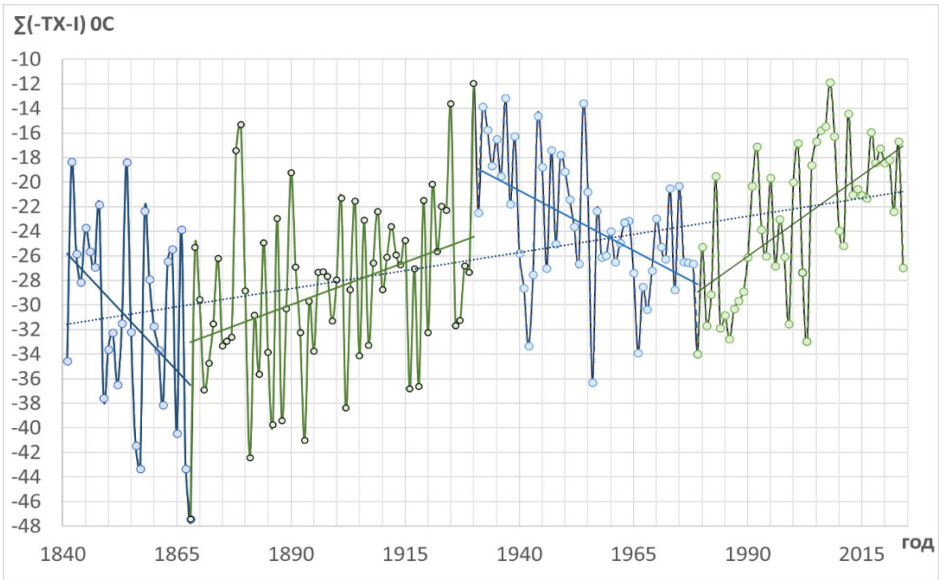


Рисунок 1. Изменение суммарного индекса условий замерзания (октябрь–январь) за многолетний период
Figure 1. Change in the total index of freezing conditions (October–January) over a long-term period

Сравнительный анализ индексов условий замерзания октября за различные периоды показал, что тренд незначим. Наименьшее значение наблюдалось в 1903 г. $\sum(-T_x)_{min} = -7{,}3$ °C, наибольшее – 2008 г., $\sum(-T_x)_{max} = 0$ °C, среднее значение $\sum(-T_x)_{ср} = -0{,}6$ °C.

В ноябре происходит постепенное накопление сумм отрицательных температур воздуха, достаточных для формирования первичных ледовых явлений – заберегов, шуги. При $\sum(-T_{X\text{-}XI}) = -10$ °C ледовые явления будет носить устойчивый характер, в первом периоде в 56 % случаев, во втором – 63 %, а в третьем и четвертом 28 % и 24 % случаев. Таким образом потепление ноябрьских температур привело к тому, что первичные ледовые явления неустойчивы.

Сравнительный анализ индексов условий замерзания октября-ноября за различные периоды показал, что тренд значим. Наименьшее значение наблюдалось в 1865 г. $\sum(-T_{X\text{-}XI})_{min} = -21{,}3$ °C, наибольшее – 2021 г., $\sum(-T_{X\text{-}XI})_{max} = -1{,}6$ °C, среднее значение $\sum(-T_{X\text{-}XI})_{ср} = -6{,}6$ °C.

В декабре, в зависимости от особенностей морфологического строения русел рек Кольского полуострова, когда на озерных и равнинных участках уже наблюдётся интенсивное нарастание толщины льды в условиях сплошного ледостава, на перекатах и участках с значительными уклонами могут наблюдаться и открытые участки

реки с интенсивным шугообразованием и участки с неполным ледоставом, промоинами и разводьям, а для формирования сплошного ледостава требуются значительное накопление сумм отрицательных температур. Сравнительный анализ индексов условий замерзания на декабрь за различные периоды показал, что тренд значим. Наименьшее значение наблюдалось в 1868 г. $\sum(-T_{X\text{-}XII})_{min} = -32{,}8$ °С, наибольшее – в 2008 г., $\sum(-T_{X\text{-}XII})_{max} = 0$ °С, среднее значение $\sum(-T_{X\text{-}XII})_{ср} = -0{,}6$ °С в декабре при $\sum(-T_{X\text{-}XII}) = -15$ °С ледостав будет сплошным, в первом периоде в 75 % случаев .во втором – 77 %, а в третьем и четвертом 47 % и 40 % случаев. Таким образом потепление декабрьских температур привело к тому, что ледостав все чаще носит несплошной характер, лед торосится и включает в себя значительное количество шуги.

Сравнительный анализ индексов условий замерзания октября-января за различные периоды показал, что тренд значим. Наименьшее значение наблюдалось в 1868 году $\sum(-T_{X\text{-}XII})_{min}=-47{,}7$ °С, наибольшее – 2008 г $\sum(-T)_{max}=-11{,}9$ °С, среднее значение $\sum(-T)ср=-26{,}2$ °С (рисунок 2).

Таблица 1. Характеристики индекса условий замерзания с октябрь по январь за период 1841–2024 гг.
Table 1. Characteristics of the freezing conditions index from October to January for the period 1841–2024

октябрь						
периоды		**1841–1868**	**1869–1930**	**1930–1979**	**1980–2024**	**1840–2024**
ИУЗ	минимальный	-4,8	-7,3	-3,4	-3,9	-7,3
	максимальный	-0,4	-0,3	-0,1	0	0
	средний	-0,8	-0,8	-0,6	-0,4	-0,6
	Δ	-0,8	0,4	-0,8	0,3	0,5
тренд	Положительный отрицательный	-	+	-	+	+
	Значимый/ незначимый	незначим	незначим	незначим	незначим	незначим
ноябрь						
периоды		**1841–1868**	**1869–1930**	**1930–1979**	**1980–2024**	**1840–2024**
ИУЗ	минимальный	-14,4	-21,3	-11,3	-12,1	-21,3
	максимальный	-2,5	-2,5	-2,1	-1,6	-1,6
	средний	-8,3	-8,2	-5,1	-4,8	-6,6
	Δ	-3,5	4,1	-4,3	3,8	5
тренд	Положительный отрицательный	-	+	-	+	+
	Значимый/ незначимый	значим	значим	значим	значим	значим
декабрь						
периоды		**1841–1868**	**1869–1930**	**1930–1979**	**1980–2024**	**1840–2024**
ИУЗ	минимальный	-28,3	-32,8	-27	-20,8	-32,8
	максимальный	-8,4	-6,1	-13,6	-5,5	-5,5
	средний	-18,1	-18,9	-13,6	-13,3	-16,1
	Δ	-4,5	8,5	-7	7,9	-8,7
тренд	Положительный отрицательный	-	+	-	+	+
	Значимый незначимый	значим	значим	значим	значим	значим
январь						
периоды		**1841–1868**	**1869–1930**	**1930–1979**	**1980–2024**	**1840–2024**
ИУЗ	минимальный	-41,4	-47,4	-36,3	-33	-47,4
	максимальный	-18,3	-12	-13,1	-11,9	-11,9
	средний	-29,3	-29,3	-23,6	-20,4	-26,2
	Δ	-10	-24,2	-28,1	-17	-20,9
тренд	Положительный отрицательный	-	+	-	+	+
	Значимый /незначимый	значим	значим	значим	значим	значим

Таким образом, уменьшение значений индекса условий замерзания приводит к изменению характеристик ледостава и уменьшению толщины льда.

Оценка пространственной изменчивости за более длительный многолетний период, относительно периода, рассмотренного в работе авторов [3], показала аналогичную стационарность распределения однородных по температурному режиму районов: первый, с наиболее высокими температурами находящийся на побережье Баренцева и Белого морей, второй – наиболее холодный в центре Кольского полуострова, и третий, соответствующей переходной области. Согласно пространственному анализу, меняется только распространение границы более теплого (первого) района. В современном периоде только в глубине Кольского полуострова сохраняются участки, где наблюдаются устойчивые отрицательные температуры воздуха (рисунок 2).

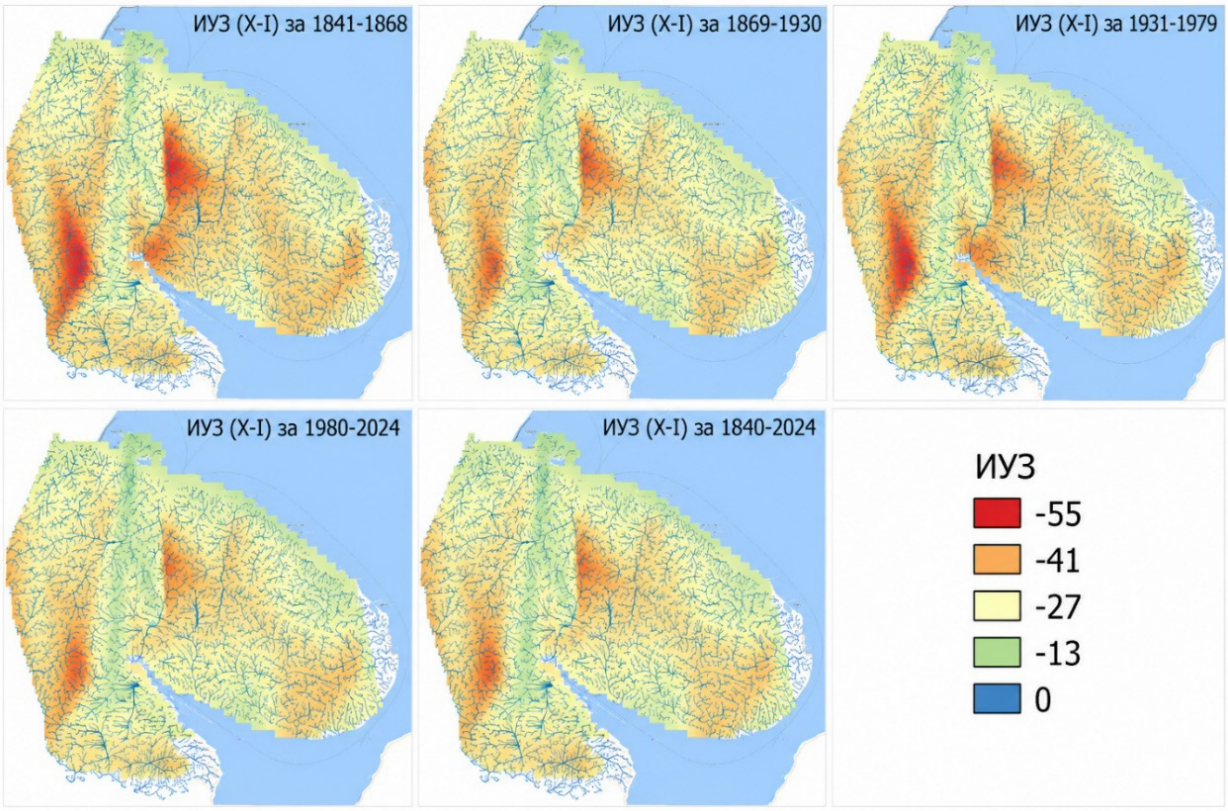


Рисунок 2. Распределение индекса условий замерзания на территории Кольского полуострова, октябрь–январь (составлено авторами на картографической основе[2] с использованием [22])
Figure 2. Distribution of the freezing conditions index on the Kola Peninsula, October–January (compiled by the authors based on cartographic data[2] using [22])

Накопление отрицательных температур от месяца к месяцу происходит по различным сценариям, поэтому был выполнен расчет индекса условий замерзания за каждый месяц на суровые умеренные и теплые месяцы (периоды). Затем были получены 19 вариаций накопления индекса условий замерзания от вариации все месяцы теплые, до вариации все месяцы холодные.

В многолетнем разрезе наибольшее число случаев, когда все индексы условий замерзания за каждый месяц относятся к (X тип) умеренному типу приходится 52 % (95 случаев), 10 % – II тип, по одному числу случаев (0,5 %) приходится на типы IX, VII, VIII, XIV, XIX, XV, XVI, XVII, XVIII. В таблице 2 приведены характеристики всех типов ИУЗ.

[2] Единая электронная картографическая основа (ЕЭКО). [Электронный ресурс] URL: https://ngw.fppd.cgkipd.ru/tile/56/{z}/{x}/{y}.png.

Таблица 2. Типизация ИУЗ и видов ледовых явлений
Table 2. Typification of freezing conditions index and types of ice phenomena

Тип ИУЗ		**X**	**III**	**VI**	**II**	**IV**	**XII**	**I**	**V**	**XI**	**XIII**	**IX**	**VII**	**VIII**	**XIV**	**XIX**	**XV**	**XVI**	**XVII**	**XVIII**
число случаев		95	19	16	15	13	5	3						1						
% от общего числа		52	10	8,7	8,2	7,1	2,7	1,6						0,5						
Тип ИУЗ *	октябрь	у	у	у	т	т	у	т	у	у	у	т	у	т	х	у	у	у	х	х
	ноябрь	у	т	т	у	т	х	т	у	у	х	у	у	у	у	х	у	х	х	у
	декабрь	у	у	т	у	у	х	т	т	х	х	т	у	у	у	у	х	х	у	у
	январь	у	у	т	у	у	х	т	т	у	х	т	т	т	х	у	х	у	х	у
Ля**	октябрь	-	-	-	-	-	::)*шс	-	-	-	::)*шс	-	-	-	::)*шс	::)*шс	::)*шс	::)*шс	::)*шс	::)*шс
	ноябрь	)*шZ	::)*ш	::)*ш	::)*шс	-	)*шZ]	-	)*ш	)*ш	IZ	)*ш	)*ш	)*ш	)*шZ	)*шZ	)*шZ	)*шIZ	)*шIZ	)*шIZ
	декабрь	IZ]	IZ]	)*шIZп	IZ]	)*шZ	IZ	)*ш	)*ш	I	I	)*ш]	)IZ	)IZ]	IZ	IZ	IZ	I	I	I
	январь	IZ]	I Z]	) * ш I]Z п	I Z	) * ш I Z п	I Z	) * ш Z	) * ш Z	I	I	) * ш Z	) * ш Z	) * ш Z	I	I	I	I	I	I

**- тип индекса условий замерзания за каждый месяц (х- холодный, у - умеренный, т – теплый) ** - вид ледовых явлений) -забереги, *-редкий шугоход, :-сало. ; - внутриводный лед,] - подо льдом шуга, С-средняя и густая снежура, Ш-средний и густой шугоход, *- редкий шугоход , Z-неполный ледостав, I -ледостав)*

Типы ИУЗ с холодными месяцами свойственны период до 1930 г., с теплым ИУЗ – современному периоду с 1980 г., умеренный ИУЗ равновероятен за весь период (рисунок 3).

Полученные результаты подтверждают ослабление суровости замерзания за последние десятилетия и структурную перестройку сроков появления и типов ледовых явлений. Практическая применимость разработанного индекса условий замерзания и его типизации заключается в возможном использовании для уточнения региональных прогностических зависимостей сроков появления первичных ледовых явлений и установления ледостава, а также при оценке последствий продолжающегося климатического потепления на гидрологический режим рек. Перспективным направлением дальнейших исследований является включение ИУЗ в предиктивный состав физико-статистических и нейросетевых моделей прогноза сроков появления ледовых явлений на территории Кольского полуострова.

Заключение

Выполненное исследование позволило количественно охарактеризовать многолетние климатические изменения в период замерзания и связанных с ними особенностей ледового режима рек Кольского полуострова. Введён и рассчитан индекс условий замерзания (ИУЗ), основанный на суммах отрицательных температур воздуха за период октябрь–январь, как по отдельным месяцам, так и за холодный сезон в целом. На основе ИУЗ разработана типизация суровости

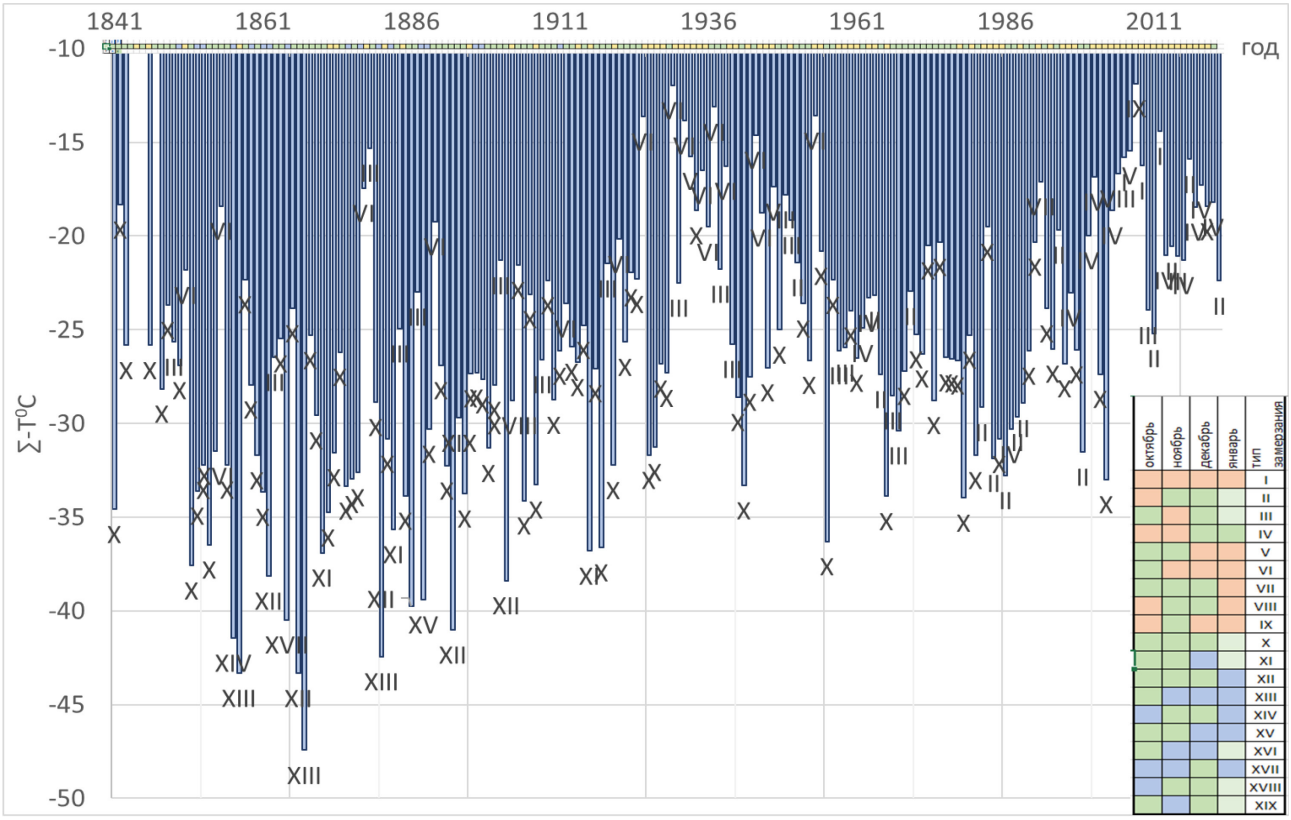


Рисунок 3. График распределения типов ИУЗ на Кольском полуострове за многолетний период
Figure 3. Distribution chart of freezing conditions index types on the Kola Peninsula over a long-term period

предзимнего периода (тёплый, умеренный, холодный месяц) и получено 19 характерных типов, для каждого из которых выделены типичные сочетания видов ледовых.

В среднем по территории за холодный сезон ИУЗ увеличился в октябре лишь на 0,5 °С, что не является статистически значимым, тогда как в ноябре, декабре и январе выявлены существенные положительные тренды: ИУЗ возрос соответственно на 5,0 °С, 8,7 °С и 20,9 °С. Это свидетельствует об ослаблении суровости замерзания именно в основной фазе формирования ледяного покрова. Типы ИУЗ с холодными месяцами характерны преимущественно для периода до 1930-х гг., тёплые типы – для современного этапа с 1980-х гг., тогда как умеренные условия замерзания встречаются примерно равновероятно в течение всего рассматриваемого периода.

Пространственный анализ ИУЗ выявил стационарность распределения однородных по температурному режиму районов, причем изменение границ характерно только для более теплого (первого) района. В современном временном периоде только в центре Кольского полуострова сохраняются участки, где наблюдаются устойчивые значительные отрицательные температуры воздуха.

Литература / References

1. Чеботарев А. И. Гидрологический словарь. 1978. 308 с.
2. Донченко Р. В. Ледовый режим рек СССР. Гидрометеоиздат, 1987. С. 247.
3. Банщикова Л. С., Сумачев А. Э. Вариация температуры воздуха холодного периода на Кольском полуострове как фактор изменения ледового режима // Арктика: экология и экономика. 2021. Т. 11. № 3. С. 397–405. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-3-397-405.

Banshchikova L. S., Sumachev A. E. Variability of air temperature during the cold period on the Kola Peninsula as a factor in changing the ice regime. Arctic: Ecology and Economy, 2021, vol. 11, no. 3, pp. 397–405. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-3-397-405. (In Russian; abstract in English).

4. Агафонова С. А., Василенко А. Н., Мироненко А. А., Фролова Н. Л. Ледовый режим и его опасные проявления на реках Арктической зоны России // Ледовые и термические процессы на водных объектах России. Тр. V Всеросс. конф. М.: Изд-во РГАУ – МСХА им. К. А. Тимирязева, 2016. С. 15–21.
5. Алексеевский Н. И., Магрицкий Д. В., Михайлов В. Н. Антропогенные и естественные изменения гидрологических ограничений для природопользования в дельтах рек Российской Арктики // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2015. № 1. С. 14–31. DOI: 10.35567/1999-4508-2015-1-2.
6. Банщикова Л.С., Сумачев А.Э., Бирюкова В.А., Канашин С.А. Опасные гидрологические явления на реках Кольского полуострова // Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций в Арктической зоне Российской Федерации: материалы научно-практической конференции, 4–7 апреля 2023 года. Мурманск: МАГУ, 2023. С. 29–31.
   Banshchikova L.S., Sumachev A.E., V.A. Biryukova, Kanashin S.A Dangerous hydrological phenomena on the Kola Peninsula rivers. Prevention and Elimination of Emergencies in the Arctic Zone of the Russian Federation: Proceedings of the Scientific and Practical Conference, April 4–7, 2023. Murmansk, 2023, pp. 29–31. (In Russian; abstract in English).
7. Василенко А. Н., Агафонова С. А., Фролова Н. Л. Исследования связи термического и ледового режимов рек Российской Арктики по данным многолетних наблюдений // Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития. Труды IV Всероссийской конференции. СПб.: Химиздат, 2020. С. 126–129.
8. Смирнова Д. А. и др. Основные черты зимнего гидрологического режима приливных устьев рек Терского берега Белого моря на примере рек Умба и Кузрека // Современные проблемы гидрометеорологии и устойчивого развития регионов. Сборник тезисов Международной конференции. СПб.: РГГМУ, 2020. С. 144–145.
9. Фролова Н. Л. и др. Антропогенные и климатически обусловленные изменения стока воды и ледовых явлений рек Российской Арктики // Вопросы географии. 2018. № 145. С. 233–251.
   Frolova N. L. et al. Anthropogenic and climate-induced changes in water runoff and ice phenomena on the rivers of the Russian Arctic. Voprosy Geografii, 2018, no. 145, pp. 233–251. (In Russian; abstract in English).
10. Баклагин В. Н. Зависимости характерных дат ледового режима Белого моря от температурного фона над его акваторией // Успехи современного естествознания. 2020. № 7. С. 55–60. DOI: 10.17513/use.37432.
    Baklagin V. N. Dependences of characteristic dates of the ice regime of the White Sea on the temperature background above its water area. Advances in modern natural science, 2020, no. 7, pp. 55–60. DOI: 10.17513/use.37432. (In Russian; abstract in English).
11. Демин В. И. Основные климатические тенденции на Кольском полуострове за период инструментальных метеорологических измерений // Труды Кольского научного центра РАН. 2012. Т. 1. № 2. С. 98–110.
12. Демин В. И., Анциферова А. Р., Мокротоварова О. И. Изменения температуры воздуха в Мурманске с начала XIX века // Вестник Кольского научного центра РАН. 2015. № 1 (20). С. 113–125.
13. Демин В. И. Священников П. Н., Иванов Б. В. Изменения крупномасштабной циркуляции атмосферы и современное потепление климата на Кольском полуострове // Вестник Кольского научного центра РАН. 2014. № 2 (17). С. 60–67.

14. Евзеров В. Я. Последствия климатических изменений четвертичного периода в Кольском регионе (на примере поздневалдайского оледенения и голоцена) // Вестник Кольского научного центра РАН. 2016. № 2 (25). С. 5–18.
Evzerov V. Ya. Effects of Quaternary Climatic Changes in the Kola Region (Exemplified with the Late Valdai Glaciation and Holocene). Herald of the Kola Science Centre of the RAS, 2016, vol. 2, pp. 5–18. (In Russian; abstract in English).

15. Ильяшук Б. П., Ильяшук Е. А., Хаммарлунд Д. Изменения климата в предгорьях Хибин, Кольский полуостров, на протяжении голоцена // Бюллетень Комиссии по изучению четвертичного периода. 2007. № 67. С. 85–96.

16. Крастынь Е. А. и др. Зимний режим приливных устьев рек Терского берега Белого моря // Четвертые Виноградовские чтения. Гидрология: от познания к мировоззрению. Сборник докладов. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2020. С. 1092–1097.

17. Романенко Ф. А., Шиловцева О. А. Геоморфологические процессы в горах Кольского полуострова и изменения климата // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2016. № 6. С. 78–86.
Romanenko F. A., Shilovtseva O. A. Geomorphological processes in the mountains of the Kola Peninsula and climate changes. Lomonosov Geography Journal, 2016, no. 6, pp. 78–86. (In Russian; abstract in English).

18. Анисимов О. А., Бадина С. В. Оптимизация региональных планов адаптации к изменению климата в арктической зоне России на основе прогностического моделирования // Арктика: экология и экономика. 2024. С.350–359. DOI: 10.25283/2223-4594-2024-3-350-359.
Anisimov O. A., Badina S. V. Optimization of regional adaptation plans to climate in the Russian Arctic based on forecasting modeling. Arctic: Ecology and Economy, 2024, vol. 14, no. 3, pp. 350—359. DOI: 10.25283/2223-4594-2024-3-350-359 (in Russian, abstract in English).

19. Сикан А. В., Малышева Н. Г., Винокуров И. О. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. СПб.: РГГМУ, 2014. 76 с.

20. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 10. Берингово море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / под ред. Ф. С. Терзиева. СПб.: Гидрометеоиздат, 1999. 300 с.

21. Яицкая Н. А., Магаева А. А. Динамика ледового режима Азовского моря в XX–XXI вв //Лёд и снег. 2018. Т. 58. №. 3. С. 373–386. DOI: 10.15356/2076-6734-2018-3-373-386.
Yaitskaya N.A., Magaeva A.A. Dynamics of the ice regime of the Sea of Azov in the XX–XXI centuries. Ice and Snow, 2018, vol.58, no.3, pp.373–386. DOI: 10.15356/2076-6734-2018-3-373-386 (in Russian, abstract in English).

22. Lehner B., Grill G. Global river hydrography and network routing: baseline data and new approaches to study the world's large river systems. Hydrological Processes, 2013, vol.27, no. 15, pp. 2171–2186. DOI:10.1002/hyp.9740.

Поступила в редакцию / Received 26.11.2025
Принята к публикации / Accepted 12.12.2025

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Банщикова Любовь Святославовна, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Государственный гидрологический институт, г. Санкт-Петербург, Россия, SPIN-код: 4301-3598, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5878-1458, e-mail: BanshchikovaLS@andex.ru.

Канашин Сергей Андреевич, аспирант, Государственный гидрологический институт, г. Санкт-Петербург, Россия, SPIN-код: 8469-3366, ORCID: https://orcid.org/0009-0003-5894-7379, e-mail: ckanashin@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Lyubov S. Banshchikova, Ph.D. (Geography), Senior Researcher, State Hydrological Institute, Saint Petersburg, Russia, SPIN-code: 4301-3598, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5878-1458, e-mail: BanshchikovaLS@andex.ru.

Sergey A. Kanashin, Postgraduate Student, State Hydrological Institute, Russia, Saint Petersburg, SPIN-code: 8469-3366, ORCID: https://orcid.org/0009-0003-5894-7379, e-mail: ckanashin@yandex.ru.

Научная статья / Scientific paper

УДК: 556.5

DOI: 10.34753/HS.2025.7.4.333

Факторы многолетних колебаний водности трансграничного озера Ханка (юг Дальнего Востока России)

Р.С. Шайгузов, В.В. Шамов, С.Ю. Лупаков

Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, г. Владивосток, Россия

e-mail: vlshamov@yandex.ru

Аннотация. В изучении гидрологического режима трансграничного оз. Ханка ключевыми остаются вопросы о причинах высоких уровней воды, которые наблюдались в последнее десятилетие, о соотношении естественного и антропогенного вклада в повышение уровней воды, а также о роли такого фактора, как сток в озеро подземных вод. В настоящей работе оценивалось влияние атмосферных осадков и речного притока на колебания уровня воды в озере в многолетнем разрезе по тесноте корреляционной связи текущего среднегодового уровня воды с суммарным объёмом этих составляющих водного баланса за различные продолжительности предшествующих лет. За период с 1951 по 2020 гг. тесная связь уровней воды отмечается с суммами осадков от 4 до 9 лет (максимальная корреляция 0,82 за 6 лет), а с речным притоком от 3 до 6 лет (0,81 за 5 лет). В разностных интегральных кривых соответствующих рядов прослеживается синхронность с некоторой задержкой уровней воды по отношению к этим составляющим. Тем самым уровень воды в оз. Ханка во многом зависит от предшествующего увлажнения его водосбора, в общем определяемого многолетними циклами муссонной циркуляции разной интенсивности. Предполагается, что в течение 3 лет (по прошествии которых связь уровня воды с речным притоком становится тесной) на водосборе происходит накопление подземных вод и затем их постепенная разгрузка в Ханку, что отражается в многолетней динамике уровня воды в озере и в корреляции годового речного притока с осадками, которая нелинейно уменьшается 3-годичными периодами по мере нарастания в прошлое суммарных осадков. Таким образом, продолжительная разгрузка подземных вод в озеро вносит значимый вклад в колебания его уровня.

Ключевые слова: озеро Ханка; уровень воды; речной сток; подземный сток; атмосферные осадки; гидрологический режим.

Для цитирования: Шайгузов Р.С., Шамов В.В., Лупаков С.Ю. Факторы многолетних колебаний водности трансграничного озера Ханка (юг Дальнего Востока России) // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2025. Т. 7. Вып. 4. С. 333–354. DOI: 10.34753/HS.2025.7.4.333.

Factors of Long-Term Water Level Fluctuations in the Transboundary Khanka Lake (the South of the Russian Far East)

Ruslan S. Shaiguzov, Vladimir V. Shamov, Sergey Yu. Lupakov

Pacific Geographical Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia

e-mail: vlshamov@yandex.ru

Abstract. The reasons of high water level in Lake Khanka that have been observed over the past decade, the ratio of natural and anthropogenic contributions to water level rise, and the role of groundwater runoff remain the key issues in studying the hydrological regime of this lake. We have estimated the impact of precipitation and river inflow on long-term water level fluctuations in the lake with the linear correlation of the current annual average water level with the summary values of these water balance constituents over different durations of previous years. For the period from 1951 to 2020, water level is closely correlated with precipitation amounts from 4 to 9 years (the maximum correlation is 0.82 for 6 years) and with river inflow from 3 to 6 years (0.81 for 5 years). The synchronicity with some delay in water level relative to these constituents is observed in the difference integral curves of the corresponding comparisons. Thus, the water level in Lake Khanka largely depends on the previous long-term moistening of its catchment, determined by the cycles of monsoon circulation of varying intensity. We assume that for 3 years (after which the water level -inflow connection becomes close) groundwater accumulates in the lake catchment and then gradually discharges into the lake. This is reflected in the long-term dynamics of water level in

the lake and in the correlation of annual river inflow with precipitation, which decreases non-linearly in the form of 3-year periods as total precipitation increases in the past. Thereby long-term groundwater discharge into Lake Khanka also contributes to water level fluctuations.

Keywords: the Khanka Lake; water level; river runoff; groundwater runoff; precipitation; hydrological regime.
For citation: Shaiguzov R.S., Shamov V.V., Lupakov S.Yu. Factors of Long-Term Water Level Fluctuations in the Transboundary Khanka Lake (the South of the Russian Far East). Hydrosphere. Hazard processes and phenomena, 2025, vol. 7, iss. 4, pp. 333–354. DOI: 10.34753/HS. 2025.7.4.333. (In Russian; abstract in English).

Введение

Озеро Ханка – крупнейший пресноводный водоём в Северо-Восточной Азии, занимающий трансграничное положение между Россией (Приморский край) и Китаем (провинция Хэйлунцзян). Оно имеет важное экономическое и экологическое значение – в его бассейне уже многие десятки лет ведётся активная хозяйственная деятельность, основу которой составляет орошаемое земледелие. Сам водоём богат рыбными запасами, а примыкающие к нему водно-болотные угодья частично включены в биосферный заповедник «Ханкайский». В силу своих географических особенностей озеро характеризуется значительными многолетними колебаниями уровней воды (УВ), которые периодически приводят к обширному затоплению прибрежных территорий. Данная проблема вызвала активное обсуждение в последнее десятилетие, когда к 2016 г. среднегодовой УВ в озере достиг исторического максимума и сохранялся на высоких отметках последующие несколько лет, что нанесло серьёзный ущерб хозяйственной деятельности на побережье. В научном сообществе стали выдвигаться различные гипотезы о причинах беспрецедентного подъема УВ и предлагаться пути решения сложившейся ситуации [1, 2].

Настоящая статья посвящена выявлению естественных закономерностей в гидрологических и метеорологических процессах в бассейне озера Ханка за многолетний период в контексте их влияния на УВ. Проанализированы проблемы, которые затрудняют изучение гидрологического режима озера. Использованы режимные данные мониторинга речного стока, УВ в озере и осадков в бассейне Ханки.

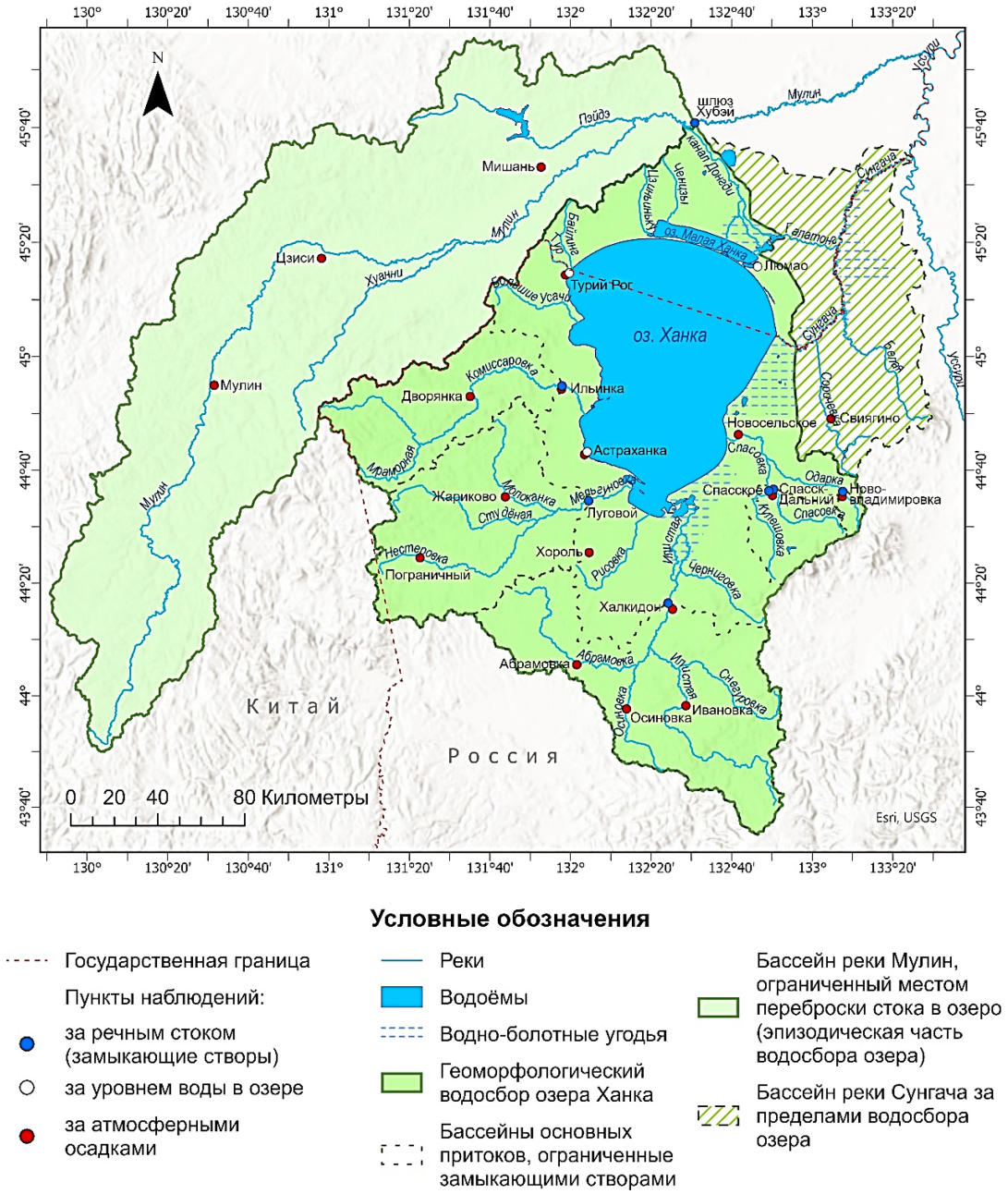
Характеристика объекта исследований

Бассейн оз. Ханка преимущественно расположен в пределах Приханкайской низменности, окружённой в приводораздельных районах низко- и среднегорьями с высотами до 900–1000 м. Площадь геоморфологического водосбора озера (без водного зеркала) составляет 16,9 тыс. км^2 (рисунок 1). Само озеро состоит из двух водоёмов – собственно оз. Ханка и оз. Малая Ханка, разделённых узкой песчаной косой. В среднем площадь зеркала Ханки составляет около 4 тыс. км^2 (Мал. Ханки – 140 км^2), а объём воды при таких размерах около 18 км^3, чему соответствует среднемноголетний УВ в 300 см (относительный) или 68,9 м (абсолютный). Вследствие многолетних колебаний УВ эти величины значительно изменяются: площадь зеркала от 3,9 тыс. до 5 тыс. км^2, объём воды от 12,7 до 24,8 км^3 (УВ от 150 до 390 см (435 см в 2016 г.) соответственно). Озеро мелководное: средняя глубина составляет 4,5–6,5 м, максимальная – 11,6 м [3, 4].

Климат в бассейне Ханки умеренный муссонный с выраженными континентальными чертами. Средняя температура июля достигает плюс 20–21 °С, а января минус 17–21 °С. За год в бассейне выпадает в среднем 600–630 мм осадков (от 500 мм в западном до 700–1000 мм в восточном и юго-восточном районах), подавляющая их часть приходит с летним муссоном. Межгодовая амплитуда осадков может достигать 300 мм в летние месяцы и до 40 мм в зимние, что связано с интенсивностью муссонной циркуляции. Испарение с поверхности суши в бассейне составляет от 570 до 690 мм в год, а с зеркала озера оценивается в 630 мм [3, 4].

В оз. Ханка впадает более 30 рек, самые крупные из которых – Илистая, Мельгуновка, Комиссаровка и Спасовка с площадями водосборов от 5470 до 1260 км^2 и длиной от 220 до 80 км соответственно. Со стороны Китая к

озеру проложен канал Донгди (40–50 км) от р. Мулинхэ, в связи с чем последняя также считается крупным, но искусственным притоком Ханки. Из озера вытекает единственная р. Сунгача (210 км), впадающая в р. Уссури. Среднегодовой речной приток в озеро составляет 2 км^3, в том числе 1,87 км^3 с российской части водосбора. От маловодных к многоводным годам эти значения меняются в пределах 0,4–5,0 км^3. Среднегодовой сток по р. Сунгача оценивается в 1,5 км^3 с межгодовой вариацией от 0,8 до 2,5 км^3 [4–6].



Условные обозначения

- Государственная граница
- Пункты наблюдений:
  - за речным стоком (замыкающие створы)
  - за уровнем воды в озере
  - за атмосферными осадками
- Реки
- Водоёмы
- Водно-болотные угодья
- Геоморфологический водосбор озера Ханка
- Бассейны основных притоков, ограниченные замыкающими створами
- Бассейн реки Мулин, ограниченный местом переброски стока в озеро (эпизодическая часть водосбора озера)
- Бассейн реки Сунгача за пределами водосбора озера

Рисунок 1. Водосбор оз. Ханка и примыкающие бассейны рек Сунгача и Мулинхэ (составлено по: [4, 8–10])[1][2]

Figure 1. The Lake Khanka catchment and the adjacent Sungacha and Muling river basins

[1] NASA Shuttle Radar Topography Mission (SRTM GL1) Global 30 m. OpenTopography, 2013. Available at: https://portal.opentopography.org/raster?opentopoID=OTSRTM.082015.4326.1.

2 Global Surface Water Explorer. Available at: https://global-surface-water.appspot.com/#features.

Гидрологический режим непосредственно озера Ханка описан в монографиях [3, 4]. Условное время водообмена озера составляет 10 лет, в связи с чем оно относится к слабопроточному водоёму. В силу большой площади водной поверхности и малых глубин озеру свойственны колебания УВ – многолетние с амплитудой до 2 м и суточные с амплитудой до 1,5 м. Последние зависят от ветровых денивеляций (сгонов и нагонов воды под действием ветра) и носят характер продольных перекосов УВ с синхронным ходом. УВ в озере также испытывают суточные и сезонные малые колебания, связанные с приливами и отливами, которые трудно зафиксировать ввиду наложения сгонно-нагонных явлений, непрерывно изменяющегося речного стока, выпадения атмосферных осадков и др. [7].

Причины многолетних колебаний УВ. До 2010-х гг. исследовательские работы в отношении озера и его состояния появлялись нечасто [3, 11–13]. Фундаментальным исследованием остаётся монография М.Г. Васьковского [3], в которой он оценил водный баланс озера и указал на естественную причину цикличности колебаний УВ – ритмичность и интенсивность муссонной циркуляции, определяющей увлажнённость территории. Примечательным также является вывод К.Г. Баканова [11], разработавшего непрерывную нелинейную вероятностную модель проточного водоёма, об увеличении продолжительности группировок лет различной водности с ростом объёма водопотребления из оз. Ханка, а также о нелинейности связи стока из озера от УВ в нём.

В коллективных монографиях, посвящённых в основном проблемам, связанным с недавним беспрецедентным повышением УВ в оз. Ханка [1, 2], отмечается, что колебания УВ имеют примерно 30-летнюю естественную цикличность, но в последние десятилетия появилась тенденция к сокращению продолжительности цикла (между двумя последними максимумами прошло около 20 лет), при этом региональные и локальные климатические, гидрологические и прочие причины колебания остаются не до конца изученными. После достижения УВ исторически высоких значений в 2015 г. стал подниматься вопрос об антропогенном влиянии на гидрологический режим озера. Согласно оценкам[3], корреляция между накопленными за несколько лет осадками и средним УВ в конкретном году за исторический период достигала 0,9, на основе чего можно заключить, что УВ в озере определяется не за счёт речного стока, формируемого осадками текущего года, а главным образом за счёт подземного притока, формируемого осадками за предшествующие 5–7 лет, однако подобная условно естественная связь с 2000-х гг. стала нарушаться в силу регулируемого сброса паводковых вод из р. Мулинхэ в оз. Ханка через гидротехнические сооружения (ГТС) в оз. Мал. Ханка.

А.Н. Махинов и В.И. Ким [14] указывают на слабую связь колебаний с глобальными климатическими процессами и выдвигают гипотезу о наложении повышенной увлажнённости водосбора озера на повышенный подземный приток, обусловленный предыдущим периодом высокого атмосферного увлажнения на фоне затруднённого стока р. Сунгачи в маловодный период. Идею о затруднённом стоке из озера развивает В.А. Раков [7], связывая высокие УВ с нарушениями местных базисов эрозии рек Сунгача и Уссури: с одной стороны, Сунгача имеет малый уклон и интенсивно меандрирует, а с другой – в районе её устья произошло искусственное сужение русла Уссури, что создаёт подпор воды. Н.Н. Бортин, А.М. Горчаков и Ю.В. Кролевецкая [15] считают, что основная причина повышения УВ – регулярная с 1975 г. переброска в озеро стока р. Мулинхэ, ими же отмечается ограниченность пропускной способности р. Сунгача (бар в районе истока, малый уклон, густая сеть каналов на территории Китая). Ю.Н. Журавлёв и С.В. Клышевская [16]

[3] Кубай Б.В. Проблемы подъёма уровня озера Ханка [Электронный ресурс] // Примпогода. 2015. URL: https://primpogoda.ru/news/comments/boris_kubaj143.

указывают также на периодический подпор со стороны р. Уссури в районе устья р. Сунгачи, что ещё больше затрудняет сток. Помимо этого, было высказано предположение [17], что сейсмические события могут влиять на Приханкайский артезианский бассейн (комплекс подземных вод (ПВ) в бассейне озера) и как следствие изменять баланс водных масс самого озера, а вертикальные движения земной коры могут приводить к подъёму УВ.

Ряд других публикаций также посвящён анализу причин колебания УВ [5, 6, 18–25]. А.Н. Махинов [27] считает, что значимую роль играет изменение гидротермического режима территории бассейна озера в результате сокращения здесь площади лесов. Ю.И. Зуенко, М.Е. Шаповалов и А.С. Курносова [23], подтверждая существующие выводы об увеличении количества осадков на водосборе и затруднённого стока из озера, отмечают, что эти факторы обеспечивают лишь дополнительный механизм современного экстремального роста УВ, и в качестве особой причины выделяют зарегулированность притока воды в озеро: в 2014–2015 гг. в озеро поступил объём притока сверх естественной нормы, а в последующие годы, вследствие изъятия и перенаправления стока, наоборот – меньше нормы. В результате этого УВ после 2016 г. оказался даже ниже, чем мог быть на самом деле. М.В. Болгов и Е.А. Коробкина [25], анализируя водохозяйственную систему Китая в районе оз. Ханка, заключают, что в годы со средней водностью забираемый из р. Мулинхэ сток полностью расходуется на нужды рисосеяния, что на баланс озера может не влиять, так как сбросы воды осуществляются в основном в р. Сунгача. При пониженной водности водных ресурсов Мулинхэ для орошения недостаточно и требуется забор воды насосными станциями (мощностью до 100 м^3/с) из Ханка и Мал. Ханки. В многоводные годы вода из Мулинхэ подаётся в канал Донгди, и для предотвращения затопления территорий все излишки воды сбрасываются в Мал. Ханку, а оттуда, через сбросные ГТС – в Ханку. С учётом предполагаемых характеристик ГТС утверждается [25], что за несколько месяцев при таких перебросках воды в озеро УВ может подняться примерно на 20–25 см.

В 2022 году сотрудниками ГГИ была издана обобщающая монография по гидрологии оз. Ханка [4], где на основе проведённых в течение нескольких лет исследований был уточнён водный баланс озера для периода с 1949 по 2015 гг. Основной вклад в современное повышение УВ, как утверждают авторы, вносят естественные процессы (суммарный речной приток, осадки на поверхность зеркала и испарение с него), доля которых составляет 82 %, доля антропогенных факторов – 18 %. Отмечая наложение одних на другие, авторы объясняют современные экстремально высокие УВ с 2015 г.

Поскольку оз. Ханка является трансграничным, проблема колебаний УВ актуальна и для Китая. В частности, в статье [10] оценивалось влияние антропогенных и естественных факторов на гидрологический цикл оз. Мал. Ханка и сделан вывод, что наибольший вклад в повышение УВ вносит изменение климата, и лишь на втором месте по важности – человеческая деятельность.

В последнее время обилие публикаций о причинах колебаний УВ в оз. Ханка показало, что единства во мнении среди учёных нет – одни авторы выделяют какой-либо ведущий фактор, другие указывают на сочетание как природных, так и антропогенных причин. В то же время полноценный сбор информации о режиме озера и его притоков остаётся затруднённым как вследствие недостаточно развитой сети наблюдений (например, отсутствие регулярных измерений стока р. Сунгачи), так и трудно- или недоступности данных с китайской части водосбора озера, особенно учитывая, что за последние десятилетия эта часть подверглась значительному преобразованию.

Роль подземного стока. Среди прямых факторов водного режима озёр – осадки, речной приток, водохозяйственная деятельность – неочевидным остаётся роль ПВ. Для оз. Ханка подземный сток – неизвестная в количественном отношении переменная. Прямой расчёт его не обеспечен достаточным числом гидрогеологических скважин, и в настоящее время наблюдения на них не ведутся. Сведения о ПВ района содержатся в некоторых публикациях [3, 26, 27], где сообщается следующее.

Приханкайскую низменность занимает Приморский сложный артезианский бассейн, в котором ПВ не имеют сплошного распространения: малые артезианские бассейны взаимосвязанно рассредоточены вокруг озера, первыми от поверхности залегают озёрный водоносный горизонт и трещинно-пластовые воды, ниже – мощный (40–50 м) горизонт с высокой водообильностью. К западу от артезианского бассейна преимущественно развиты трещинные и напорные трещинно-жильные воды с низкой водообильностью. В среднем на Приханкайской низменности глубина залегания грунтовых вод незначительна – от 2 до 10 м, встречаются участки с глубиной до 30 м. Питание ПВ получают за счёт атмосферных осадков преимущественно в горной периферии водосбора озера, откуда движение ПВ направлено к центральной части бассейна, а их разгрузка происходит путём перетекания из нижележащих горизонтов в вышележащие (вплоть до приповерхностных) как в реки, так и возможно, в само озеро. Зона интенсивного водообмена охватывает верхние водоносные горизонты мощностью до 100 м, где сказывается дренирующее влияние речной сети. Здесь приток ПВ в озеро происходит главным образом у западного и южного берега, а движение ПВ по бассейну преимущественно направлено вдоль стока основных рек (Комиссаровки, Мельгуновки, Илистой) и их притоков.

В ранних водобалансовых расчётах подземный сток не учитывался: М.Г. Васьковский [3], например, счёл его незначительным. Последующие исследования, наоборот, стали предполагать существенный объём этой составляющей. Исходя из информации в Диагностическом анализе бассейна оз. Ханка [12], большие запасы ПВ залегают как в китайской, так и в российской частях бассейна, особенно в Приханкайском артезианском бассейне; отмечается также зависимость гидрологического режима озера от притока и оттока ПВ.

В исследовании В.А. Чудаевой [13] предполагается, что в западной части Ханкайской депрессии подземный сток может быть сопоставим с поверхностным, а в юго-восточной части подземные горизонты (обнаруженные на глубине 15 м) могут пополняться озёрными водами. Указывается общее направление движения ПВ от юго-западной части бассейна озера к северо-восточной, а их поступление в водоём может происходить как по разломам в коренных породах, так и по аллювиальным отложениям, что оказывает влияние на химический состав поверхностных вод. Так, на удалении от берега в озёрных водах В.А. Чудаевой зафиксировано повышенное содержание некоторых металлов и редкоземельных элементов, что указывает на их разгрузку непосредственно в озеро через дно. Также вблизи глубинных разломов (район устья р. Спасовка) на песчаном дне озера был отмечен выход пузырьков газа, что могло быть связано с субаквальной разгрузкой подземных вод.

Подземному стоку в озеро способствуют и другие факторы. В Атласе почв юга Дальнего Востока [28] отмечается, что в холодный период благодаря термическому градиенту сезонно-мёрзлый слой почв насыщается влагой до полной влагоёмкости, т.е. запасы воды в нём становятся высокими, а в тёплый период за счёт обильных муссонных дождей образуется верховодка и в суглинистых почвах получают развитие процессы гидроморфизма.

Оценка подземного стока в озеро была получена с помощью гидрологической модели HBV [29], при этом время транзита основной части грунтовых вод, сосредоточенной в возвышенных западной и южной частях бассейна озера, достигает 2–3 лет. Сама разгрузка происходит как через речную сеть, так и, возможно, субаквально у западного берега, сложенного песчаными и супесчаными отложениями. Авторы связывают длительное стояние высокого УВ в озере с наложением периода повышенного речного притока и времени разгрузки объёма ПВ, накопленного за предыдущие 2–3 года.

Материалы и методы

Факторы влияния на УВ в водоёмах имеют уникальную временную и пространственную частоту, что усложняет причинно-следственные связи колебаний УВ, однако эти факторы часто рассматриваются как линейные – другими

словами, колебания УВ являются следствием отдельных составляющих водного баланса [30]. Так, в механизме колебаний УВ оз. Ханка можно выделить следующие главные составляющие: в приходной части – осадки, выпадающие на зеркало озера, и речной приток, который в совокупности с подземным притоком представляет собой просочившуюся часть осадков, выпадающих на водосбор озера (без его зеркала); в расходной – испарение с зеркала и речной сток по р. Сунгача. В пределах российской части водосбора наблюдения осуществляются сетью Приморского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (рисунок 1): в 14 пунктах – за осадками (из которых 7 метеостанций и 7 отдельных осадкомеров); на нескольких гидрологических постах – за речным стоком (6 из которых – замыкающие створы); непосредственно за УВ в озере – на двух озёрных постах. Измерение испарения в бассейне озера производится только на двух береговых метеостанциях, что не совсем точно отражает эту величину для поверхности водоёма, а наблюдения за стоком р. Сунгача производилось эпизодически [4]. В связи с этим расходные составляющие имеют оценочный характер, поэтому в анализе не учитывались. На китайской территории наблюдения проводятся в бассейне р. Мулинхэ в трёх осадкомерных пунктах, нескольких гидрологических постах и одном озёрном посту на оз. Мал. Ханка [10], однако данные этих наблюдений отсутствуют в открытом доступе и учесть их не представляется возможным. На основе имеющихся российских данных для анализа выбран период в 70 лет – с 1951 по 2020 гг.

Измерения осадков в бассейне оз. Ханка отличаются нерегулярностью. Половина пунктов наблюдений содержит пропуски разной периодичности, особенно это характерно до 1955 г. (отсутствие измерений) и с 2016 г. (некруглогодичные). Поскольку для оценки общего увлажнения в бассейне осадки следует усреднить, то во избежание некорректности результата пропуски были восстановлены с помощью глобальной базы данных климатического реанализа CRU-TS-4.09[4] [31], представленной в виде растровых ячеек с пространственным разрешением в 2,5 минуты градусной сетки, которые содержат ежемесячные величины выпавших на этом участке осадков. С помощью инструментов программного обеспечения ArcGIS данные из растровых ячеек были извлечены в виде годовых сумм осадков в точечные объекты с координатами пунктов наблюдений.

Слой осадков, измеренный в нескольких неравномерно распределённых по большой площади пунктах, может лишь приблизительно характеризовать поле генетически однородных осадков и их реальное количество на определённой территории. В связи с этим данные климатического реанализа извлекались не только в точки, но и в площадные объекты, что позволило охватить весь водосбор озера и учесть территории, данные наблюдений с которых отсутствуют в открытом доступе (бассейн р. Мулинхэ). Помимо этого, поскольку площадь зеркала озера ежегодно колеблется в зависимости от УВ, то при помощи глобальной базы данных по поверхностным водам [9], отображающей местоположение и временное распределение водных объектов за период 1984–2021 гг., был выделен вариант зеркала при высоких стояниях УВ с площадью 4314 км^2 (за исключением подверженных затоплению водно-болотных угодий к востоку от озера, так как они не составляют с зеркалом единого целого из-за обилия сплавин). Для этой площади осадки извлекались отдельно. Таким способом получены смоделированные усреднённые ряды осадков над зеркалом озера и его водосбором (рисунок 2).

За объём речного притока в озеро брались значения стока на замыкающих створах. Для основных притоков озера они расположены на следующем расстоянии от устья: 25 км у рек Комиссаровка и Мельгуновка, 60 км – у Илистой и Спасовки. Для последних существует недоучёт полного стока, так как створы расположены выше

[4] Historical monthly weather data. WorldClim. Available at: https://www.worldclim.org/data/monthlywth.html.

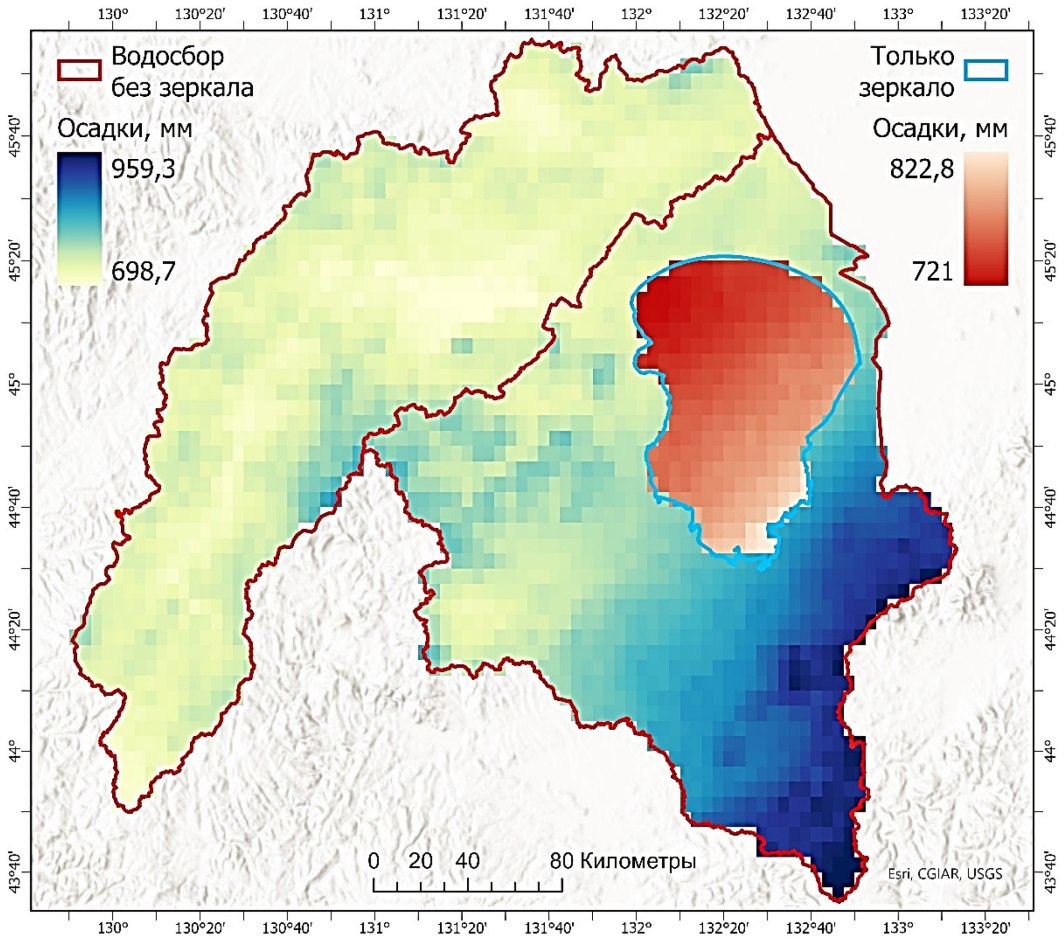


Рисунок 2. Извлечение растровых ячеек с данными климатического реанализа CRU-TS-4.09 на примере суммы осадков (в мм) за 2020 г. (составлено по [9, 31])

Figure 2. Extraction of raster cells with climate reanalysis data using the precipitation amount (mm) for 2020 as an example

впадения их относительно крупных притоков: на Илистой – выше впадения рек Березянка, Черниговка и Дмитриевка; на Спасовке – выше впадения рек Кулешовка и Одарка. На притоках Спасовки, однако, имеются стоковые посты, поэтому сток этих притоков суммирован со стоком основной рекой.

Наблюдения за стоком также характеризуются пропусками. Полный ряд имеется только для рек Комиссаровка и Илистая, тогда как на р. Мельгуновка измерения прекращены с 1996 г. (пост ныне не действует), на р. Спасовка в сумме с её притоками – нет данных до 1974 г. Для восстановления пропусков выбран метод гидрологической аналогии с последующим приведением данных к длительному периоду аналитическим способом (с помощью регрессионного анализа) [32, 33]. Реки-аналоги для расчётных створов были подобраны в пределах водосбора оз. Ханка, так как между собой географические условия бассейнов этих рек преимущественно совпадают [3]: для Мельгуновки – смежная река-аналог Комиссаровка, для Спасовки – Илистая, для Кулешовки и Одарки – Спасовка. В дополнении к анализу из монографии [4] взят рассчитанный тем же методом ряд речного притока в совокупности с российской и китайской частей водосбора Ханки. Поскольку этот ряд ограничен 2015 г. для восстановления данных за 2016–2020 гг. в качестве ряда-аналога выбран суммарный приток рек Комиссаровки, Мельгуновки, Илистой и Спасовки, т.к. они составляют подавляющую долю притока в озеро.

Озёрные посты Астраханка и Турий Рог, на которых измеряют УВ, в силу своего расположения на западном берегу Ханки, не могут отражать истинную величину УВ,

усреднённую по всей площади зеркала озера на заданный момент. Дополнительные погрешности вносят ветровые денивеляции, и это характерно не только для противоположных берегов, когда, например, в суточном разрезе на западном наблюдается сгон, а на восточном – нагон, но и для одного западного берега, когда в Турьем Роге (север) наблюдается сгон, а в Астраханке (юг) – нагон [3]. Для устранения влияния денивеляции использован ряд УВ с исключением сгонов и нагонов, полученный в работе [29] с помощью методов регрессии и декомпозиции.

Данные по среднегодовым значениям УВ (с исключением сгонов и нагонов), годовым суммам осадков и объёмам речного притока с восстановлением пропусков подвергались проверке на однородность с помощью статистических критериев (экстремальных значений, средних и дисперсий), а также на наличие автокорреляции и тренда [34]. Для критериев средних и дисперсий ряды разбивались на 2 выборки, а годом нарушения между ними выбран 1975 год, с которого отмечается расширение площади орошаемого земледелия в бассейне Ханки и увеличенный объём переброски вод р. Мулинхэ в озеро [4]. Смоделированные данные прошли верификацию и валидацию, для чего были выбраны 4 пары рядов (смоделированные по отношению к наблюдённым): a) УВ, усреднённый между постами – без сгонов/нагонов и с ними; b) осадки, осреднённые по 14 пунктам наблюдений – с восстановлением пропусков и без; c) осадки, усреднённые по всему водосбору (за исключением зеркала) и по 14 пунктам с восстановлением пропусков; d) осадки, усреднённые по зеркалу и по двум береговым пунктам. Предполагается, что если смоделированные осадки для геоморфологического водосбора озера соответствуют наблюдённым, то и смоделированные осадки для бассейна р. Мулинхэ тоже будут близки к действительным. Верификация производилась с помощью общепринятых статистических метрик [35–38]: среднеквадратические отклонение (σ), средние систематическая (ME), абсолютная (MAE) и квадратическая (RMSE или S) ошибки; валидация – с помощью коэффициентов корреляции (R) и эффективности Нэша-Сатклиффа (NSE), а также отношения среднеквадратической ошибки к среднеквадратическому отклонению (S/σ). Категории значений для метрик валидации принимаются следующими: «хорошо» при $R \geq 0{,}87$, $NSE \geq 0{,}80$, $S/\sigma \leq 0{,}5$; «удовлетворительно» при $R = 0{,}86 \ldots 0{,}61$, $NSE = 0{,}79 \ldots 0{,}36$, $S/\sigma = 0{,}51 \ldots 0{,}80$; «плохо» при $R = 0{,}60 \ldots 0{,}31$; $NSE \leq 0{,}35$, $S/\sigma = 0{,}81 \ldots 1{,}00$; «бесполезно» при $R \leq 0{,}30$ и $S/\sigma \geq 1{,}01$.

В многолетнем разрезе отклики УВ на осадки и речной приток могут иметь нелинейный характер [11]. Так, в многоводные годы запасы влаги в бассейне накапливаются, а в маловодные годы срабатываются [32]. Тем самым представляется, что озёрный запас воды, который можно выразить в виде среднегодового УВ, обусловлен не только приходными составляющими этого года, но и их накоплением за предыдущий период и последующей сработкой. В связи с этим накопленный объём отдельных приходных составляющих рассчитывался как сумма за предшествующие годы и представлялся в виде суммарных выборок лет (2-, 3-, 4-леток и т.д.), нарастающих от текущего года к прошедшим. Количество таких лет зависит от ситуации – конкретно для оз. Ханка можно ограничиться десятью предшествующими годами в связи с временем водообмена, оцененным в 10 лет. Длина выборок при таких манипуляциях изменяется незначительно – с 70 лет при сравнении текущих лет до 60 лет при сравнении текущего года с десятью предыдущими, поэтому полученные ряды принимаются репрезентативными и однородными, что позволяет их сравнивать без потери достоверности.

Сравнение суммарных продолжительностей осадков и речного притока с текущим УВ в озере проводилось методом корреляционного анализа [32]. В целом принято считать, что достаточная теснота связи определяется значениями коэффициента корреляции (R) не менее 0,75 [39], поэтому эта величина принята за граничное условие оценки тесноты связи. Визуально многолетнюю

динамику процессов и их сравнение в наилучшем виде отображают разностные интегральные кривые, так как они сглаживают межгодовые колебания, позволяя отследить многолетние циклы и отдельные тенденции; метод расчёта ординат интегральных кривых ($\int(t)$) приведён в [39].

Учитывался также следующий момент. Накопление влагозапаса в бассейне происходит как в самом водоёме, так и в виде запаса ПВ [30, 40]. Влияние последних на УВ в озере не является очевидным: если осадки, выпадающие на зеркало озера, напрямую контролируют УВ в нём, то осадки, выпадающие на поверхность водосбора, требуют какого-то времени на инфильтрацию в ПВ и на миграцию в область их разгрузки: от нескольких месяцев для почвенно-грунтовых вод до нескольких лет для вод глубоких водоносных горизонтов. Можно оценить такую величину запаздывания отклика УВ в озере на предшествующее увлажнение [30], в связи с чем осадки, выпадающие на водосбор и на зеркало озера, анализировались по отдельности.

Результаты и их обсуждение

Анализ исходных данных. Динамика наблюдённых, восстановленных и смоделированных осадков на водосборе оз. Ханка представлена на рисунке 3, где прослеживается синхронность их хода.

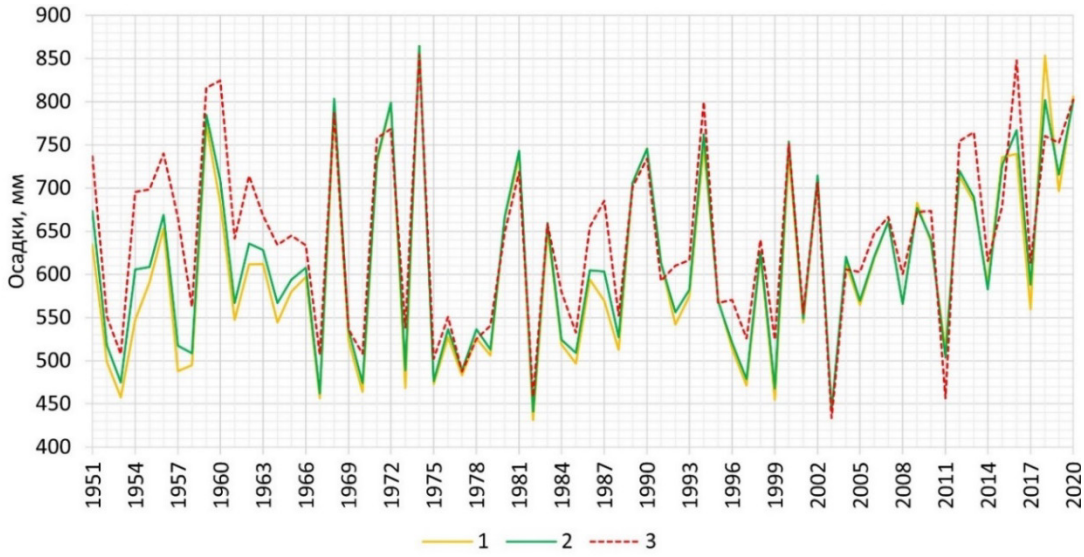


Рисунок 3. Динамика годового слоя осадков (в мм) на водосборе оз. Ханка с 1951 по 2020 гг.: 1 – осреднённый по 14 пунктам ряд осадков с пропусками; 2 – осреднённый по 14 пунктам ряд осадков с восстановлением пропусков; 3 – осреднённый по водосбору ряд смоделированных осадков
Figure 3. Dynamics of the annual precipitation depth (mm) in the Lake Khanka catchment from 1951 to 2020: 1 – a series of precipitation averaged over 14 stations with skips; 2 – a series of precipitation averaged over 14 stations with the restoration of skips; 3 – a series of simulated precipitation averaged over the catchment

Также между измеренными и восстановленными осадками периодически наблюдается небольшая разница в их величине, что связано с числом пунктов наблюдений с пропусками за конкретный год. Полностью смоделированный ряд данных как по отдельным годам, так и за весь период также в целом соответствует данным наблюдений. До 1966 г., однако, заметно расхождение смоделированных и наблюдённых данных, что, скорее всего, объясняется не применёнными к исходным данным поправочными коэффициентами на смачивание и выдувание, без которых существовала погрешность в измерении осадков приборной базой тех лет [4].

Результаты оценки объективности выбора рек-аналогов и последующего восстановления пропусков удовлетворяют условиям – коэффициенты корреляции составляют не менее 0,8, а ошибки коэффициента регрессии не

превышают критического значения. Ошибки восстановленных норм стока рек не превышают 10 %, тем самым пропуски приведены к многолетнему периоду с высоким уровнем достоверности. Динамика восстановленных рядов стока отдельных притоков и совокупного стока со всего водосбора отображена на рисунке 4. Прослеживается синхронность стока рек, что говорит о преобладании единых тенденций в пределах бассейна Ханки.

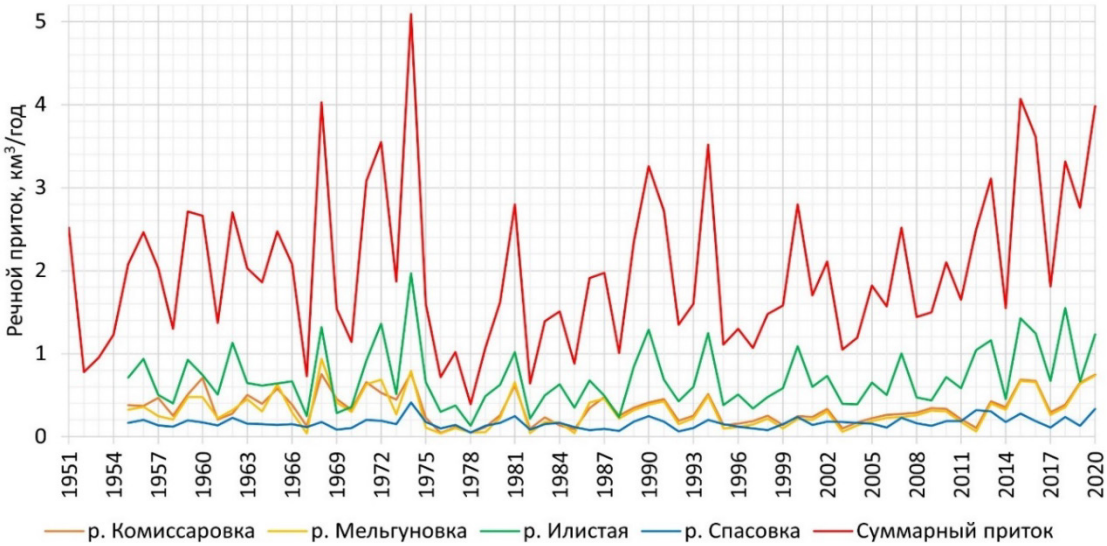


Рисунок 4. Динамика речного притока (в км^3) в оз. Ханка с 1951 по 2020 гг.
Figure 4. Dynamics of river inflow (km^3) to Lake Khanka from 1951 to 2020

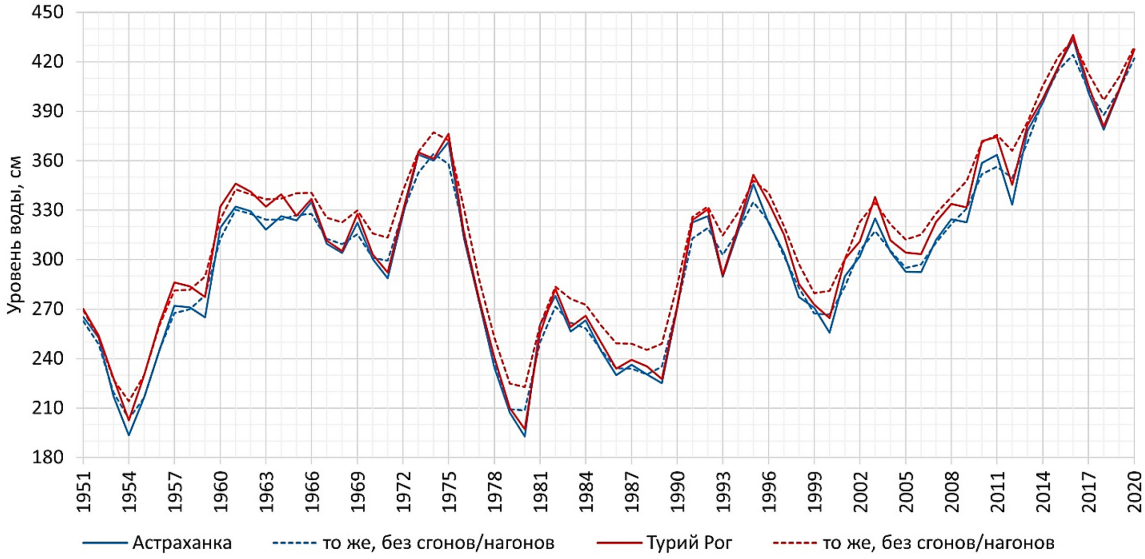


Рисунок 5. Динамика среднегодового УВ (в см) на двух постах оз. Ханка с 1951 по 2020 гг.
Figure 2. The dynamics of the average annual WL (cm) at the two stations of Lake Khanka from 1951 to 2020

Динамика наблюдённых и скорректированных среднегодовых УВ представлена на рисунке 5: в среднегодовом разрезе влияние ветровой денивеляции бывает весьма существенным – разница между УВ, измеренными на постах, периодически то увеличивается на несколько сантиметров (с 1957 по 1964, с 2000 по 2012 гг.), то полностью исчезает. Скорректированный ряд сглаживает межгодовые колебания, вызванные завышением или занижением УВ вследствие сгонов и нагонов, а также устраняет периодичность в разнице между постами, стабильно оставляя её в пределах нескольких сантиметров за весь рассматриваемый период, при этом в Турьем Роге УВ в среднем выше, чем в Астраханке.

На графике в многолетних колебаниях УВ прослеживаются два цикла водности: либо по границам маловодных лет – с 1955 по 1980 гг. и с 1981 по 2006 гг. с максимумами в 1975 и 1995 гг. соответственно, либо по границам многоводных лет – с 1976 по 1995 гг. и с 1996 по 2016 гг. с минимумами в 1980 и 2000 гг. соответственно. Так как УВ зависит от осадков и речного притока, то для последних двух выделяются аналогичные циклы. Ряд с большим количеством лет наблюдений и наличием минимум одного или двух многолетних циклов колебаний водности позволяет считать репрезентативным (согласно [32]) выбранный по имеющимся данным период с 1951 по 2020 г.

Значительная автокорреляция из года в год присутствует только у значений УВ (0,94), тогда как у осадков и речного притока она близка к нулю, что отражает их случайность. Ошибки автокорреляции показывают соответствующие значения – наибольшая у УВ (12 %, но в целом приемлемая), наименьшая у осадков и речного притока (2 % и 6 % соответственно). Отмечается положительный тренд во всех трёх рядах, однако значимым он оказался только для УВ. Рассчитанные статистики критериев экстремальных значений, средних и дисперсий оказались меньше критических, соответственно в последних двух антропогенное вмешательство не повлияло на однородность данных.

Все четыре смоделированных ряда также демонстрируют хорошие результаты тестов (таблица 1). Верификация не выявила каких-либо значимых ошибок: средние между сравниваемыми рядами и их σ отличаются незначительно – у УВ и осадков на водосборе (a, b, c) смоделированные средние несколько выше наблюдённых, у осадков на зеркале (d) ниже, поэтому ME показывает соответственно понижение разницы для первых и повышение для последних; σ для всех данных ниже наблюдённых, что говорит об уменьшении рассеивания в смоделированных данных; MAE и RMSE внутри пар рядов достаточно близки по значениям – выбросы не привели к увеличению ошибки, поэтому везде она меньше 10 % от среднего. Наилучший результат в валидации показали смоделированные ряды по УВ и осадкам (a, b) – R и NSE практически равны единице, а S/σ близка к 0, соответственно УВ без сгонов/нагонов и восстановленные осадки достоверны. Метрики у осадков по реанализу (c, d) несколько ниже предыдущих, но в такой же категории «хорошо» – R>0,9, NSE>0,8, S/σ<0,5, соответственно, пространственно-смоделированные осадки также достоверны.

Таблица 1. Результаты качества смоделированных рядов данных
Table 1. Quality results of the modeled data series

Статистические метрики	**a**		**b**		**c**		**d**	
	x	**y**	**x**	**y**	**x**	**y**	**x**	**y**
Среднее значение	306,4	310,1	604,8	614,3	614,3	641,9	604,8	602,6
σ	55,5	53,5	108,9	105,7	105,7	103,2	106,3	95,4
ME	-3,7		-9,5		-27,6		2,2	
MAE	6,2		12,2		36,9		32,2	
RMSE (S)	7,8		16,6		46,8		44,4	
R	0,99		0,99		0,93		0,91	
NSE	0,98		0,98		0,80		0,82	
S/σ	0,15		0,16		0,45		0,46	

Обозначения: усреднённые данные по: a – УВ между постами (x – наблюдённые, y – без сгонов/нагонов); b – осадкам на 14 пунктах (x – наблюдённые, y – восстановленные); c – осадкам на водосборе (x – восстановленные, y – данные реанализа); d – осадкам на зеркале (x – восстановленные на 2 береговых пунктах, y – данные реанализа)

Designations: averaged data: a – WL between stations (x – observed, y – except for wind setup); b – precipitation at 14 stations (x – observed, y – restored); c – precipitation in the catchment (x – restored, y – reanalysis data); d – precipitation on the water lake surface (x – restored at 2 coastal stations, y – reanalysis data)

Стоит отметить, что смоделированные осадки, усреднённые по площади зеркала (d), сравнивались со средним значением только между двумя береговыми пунктами наблюдений – Турий Рог и Новосельское, так как они находятся на противоположных берегах. Между ними условно можно провести линию, которая практически совпадает с направлением уменьшения выпадения осадков на поверхность озера с юго-востока на северо-запад (рисунок 2). Тем самым осадки в пункте Новосельское примерно отражают наибольшее их количество над озером, а в Турьем Роге – наименьшее. Включение в расчёт пункта Астраханка (что встречается в публикациях [3, 4]) сместит область тяготения в усреднении осадков в сторону юго-запада и увеличит погрешность результата: RMSE повышается на 1 % от среднего, S/σ и NSE переходят из разряда «хорошо» в «удовлетворительно» (0,52 и 0,77 соответственно), R также понижается (0,89), хотя и остаётся в той же категории.

Анализ влияния метеорологических факторов. Расчёты демонстрируют практическое отсутствие связи среднегодового УВ в оз. Ханка с выпавшими в любом том же году осадками, усреднёнными по 14 пунктам наблюдений. Если же учитывать осадки, накопленные за предыдущие годы, то их связь с УВ усиливается. Это выражается в увеличении коэффициента корреляции по мере нарастания суммарной продолжительности предшествующих лет (таблица 2).

Таблица 2. Коэффициенты корреляции между УВ в оз. Ханка и суммами осадков на его водосборе с учётом предшествующих лет за период 1951–2020 гг. и отдельные циклы водности

Table 2. Correlation coefficients between the WL in Lake Khanka and precipitation amounts in its catchment, considering previous years for the period 1951–2020 and individual cycles of water content

Период, гг.	$\sum Y_1$	$\sum Y_2$	$\sum Y_3$	$\sum Y_4$	$\sum Y_5$	$\sum Y_6$	$\sum Y_7$	$\sum Y_8$	$\sum Y_9$	$\sum Y_{10}$
1951–2020	0,283	0,549	0,710	0,771	0,802	0,824	0,797	0,786	0,764	0,732
1971–2020	0,314	0,586	0,726	0,795	0,824	0,846	0,807	0,787	0,769	0,747
1955–1980	0,111	0,419	0,674	0,777	0,792	0,812	0,718	0,737	0,614	0,480
1981–2006	-0,099	0,079	0,304	0,464	0,574	0,648	0,647	0,558	0,591	0,511
1976–1995	0,014	0,289	0,598	0,713	0,843	0,910	0,810	0,647	0,604	0,485
1996–2016	0,361	0,614	0,721	0,854	0,873	0,921	0,868	0,814	0,772	0,766

Обозначения: ∑Yi – сравнение с суммой приходной составляющей за i количество лет, где i=1…10 (1 – только за текущий год; 2 – за последние два года (включая текущий); 3 – за последние три года; и т.д.)

Designations: ∑Yi is a comparison with the amount of the incoming component of the water balance for the i number of years, where i=1...10 (1 – for the current year only; 2 – for the last two years (including the current one); 3 – for the last three years; etc.)

Тесная связь УВ в озере отмечается с суммой осадков за предшествующий период от 4 до 9 лет, максимальная корреляция с коэффициентом 0,82 достигается с суммой за 6 лет. После достижения максимума связь с каждым последующим добавлением года постепенно уменьшается. Если рассмотреть отдельный период в 50 лет (с 1971 по 2020 гг.), то связь за аналогичные выборки лет несколько улучшается (до 0,85 за 6 лет), что можно объяснить сравнительно симметричным распределением циклов водности в этом промежутке. При рассмотрении отдельных циклов, если привязывать их границы к маловодным годам (строки 3–4 таблицы 2), то связь между УВ и суммарными осадками поддерживается только в первый из них (0,81 за 6 лет), тогда как во втором она падает до 0,65. В целом заметно, что такой вариант цикла водности в последние десятилетия нарушился, и минимум УВ в 2006 г. отличается по величине от аналогичных в 1954 и 1980 гг. (рисунок 5), поэтому переход из маловодной в многоводную фазу растягивается. Однако если брать циклы с границами по многоводным годам (строки 5–6 таблицы 2), то коэффициент корреляции в обоих циклах возрастает до 0,91–0,92.

Таким образом объём осадков, выпавших на водосбор озера в течение предшествующих лет, значимо влияет на средний УВ в текущем

году. Это также отражается в разностных интегральных кривых, на которых видна синхронность хода УВ с суммами осадков – наибольшая прослеживается для 6-летней суммы осадков (рисунок 6). Также заметно, что УВ запаздывает по синхронности с осадками за меньшие выборки лет, а особенно с осадками текущего года (в среднем на 3 года). Например, во время первой многоводной фазы более интенсивное увеличение количества среднегодовых осадков началось с 1968 г., достигнув своего максимума в 1974 г., что через 6 лет от начала увеличения прямо отразилось на высоких УВ в озере в 1975–1977 гг. Аналогичные ситуации с задержкой и откликом происходили и в следующие многоводные фазы: с 1989 г. также в течение 6 лет нарастание количества осадков и высокие стояния УВ в 1995–1997 гг.; и с 2012 г. – нарастание с максимумом в 2016 г.

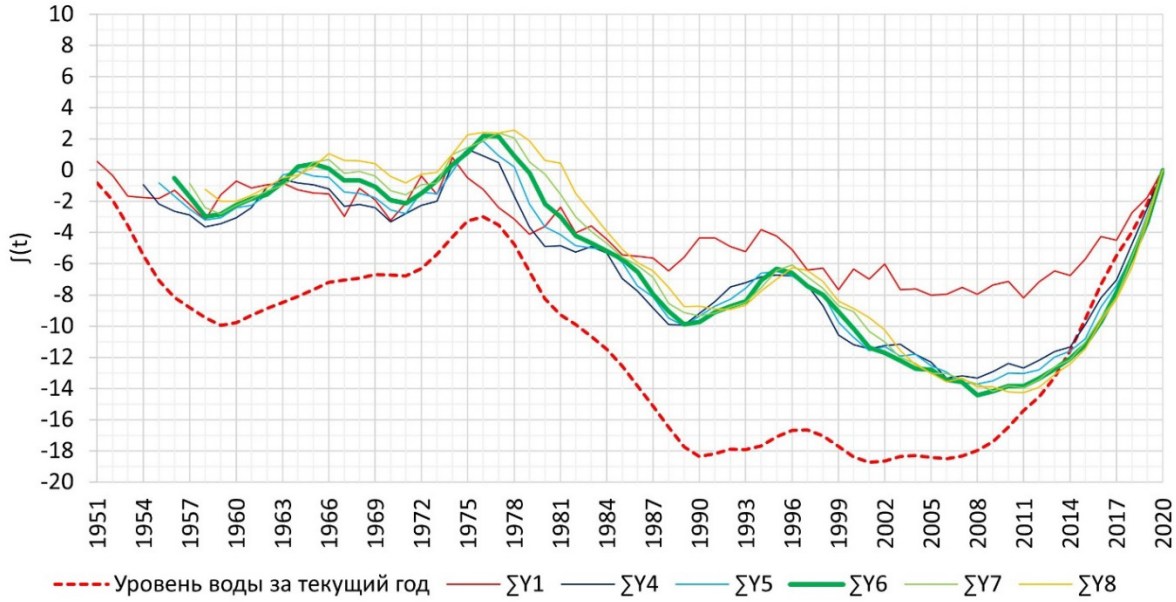


Рисунок 6. Разностные интегральные кривые УВ в оз. Ханка и сумм осадков на его водосборе за 1951–2020 гг.

Figure 6. Differential integral curves of the WL in Lake Khanka and precipitation amounts in its catchment for 1951–2020

Усреднение смоделированных осадков по водосбору (a), отдельно по зеркалу (b), и вместе (c) приводит к получению схожих значений корреляции с осреднёнными по 14 пунктам наблюдений за те же суммарные продолжительности лет, достигая 0,82–0,83 за 6 лет при выборке с 1971 г. (таблица 3). Тем самым смоделированные данные, хоть и исключают пространственную неоднородность осадков, не показывают, как ожидалось, более высокой величины корреляции в связи с УВ. Между собой эти три ряда также практически не различаются по величине корреляции, что говорит о сопоставимости влияния на УВ осадков, выпадающих отдельно на водосбор и отдельно на водное зеркало озера.

Включение в осреднение осадков в бассейне р. Мулинхэ (таблица 3d) для всей выборки отражается на связи хуже (R=0,68), поскольку приращение бассейна реки к водосбору озера, как указывалось ранее, происходит в отдельные годы, когда на этой реке формируются высокие паводки. Корреляция возрастает до 0,77, если включить в усреднение осадки (e), выпавшие в бассейне Мулинхэ только за годы, когда сток с оз. Малая Ханка выше среднего (при среднем значении 0,09 км^3, минимуме 0,01 км^3 и максимуме 0,29 км^3 за период 1951–2015 гг., в котором 24 года были со стоком выше среднего [4], что с большой вероятностью означает сброс в оз. Ханка больших объёмов паводковых вод). Эта корреляция меньше величины связи по сравнению с осреднением по геоморфологическому водосбору, поскольку не весь сток Мулинхэ, даже повышенный, сбрасывается в озёра [4, 10, 25] – часть его

расходуется на орошение прилегающих сельскохозяйственных полей. Поэтому осадки, выпавшие в бассейне р. Мулинхэ, в полной мере не отражают объёма воды, достигшего Ханки, и тем не менее связь между их бассейнами статистически подтверждается.

Таблица 3. Коэффициенты корреляции между УВ в оз. Ханка и суммами смоделированных осадков на его водосборе с учётом предшествующих лет за периоды 1951–2020 гг. и 1971–2020 гг.
Table 3. Correlation coefficients between the WL in Lake Khanka and modeled precipitation amounts in its catchment, considering previous years for the periods 1951–2020 and 1971–2020

Период, гг.	$\sum Y_1$	$\sum Y_2$	$\sum Y_3$	$\sum Y_4$	$\sum Y_5$	$\sum Y_6$	$\sum Y_7$	$\sum Y_8$	$\sum Y_9$	$\sum Y_{10}$
a) Усреднённые по водосбору (в естественных границах и без зеркала)										
1951–2020	0,231	0,454	0,587	0,630	0,659	0,670	0,650	0,642	0,621	0,614
1971–2020	0,325	0,580	0,722	0,789	0,811	0,824	0,782	0,758	0,742	0,739
b) Усреднённые по зеркалу										
1951–2020	0,242	0,462	0,581	0,621	0,642	0,643	0,612	0,591	0,559	0,544
1971–2020	0,341	0,600	0,731	0,797	0,813	0,818	0,764	0,720	0,690	0,674
c) Усреднённые по водосбору с зеркалом										
1951–2020	0,237	0,460	0,586	0,628	0,653	0,660	0,634	0,620	0,594	0,582
1971–2020	0,334	0,592	0,729	0,796	0,816	0,826	0,777	0,744	0,722	0,713
d) Осреднённые по водосбору, включая бассейн р. Мулинхэ										
1951–2020	0,220	0,396	0,501	0,528	0,550	0,550	0,527	0,512	0,486	0,469
1971–2020	0322	0,510	0,623	0,664	0,681	0,671	0,624	0,591	0,565	0,541
e) то же, что и «d», но только за годы повышенного сброса паводковых вод										
1951–2020	0,216	0,413	0,531	0,570	0,601	0,605	0,578	0,562	0,535	0,520
1971–2020	0,312	0,537	0,669	0,736	0,763	0,768	0,716	0,679	0,654	0,636

Таким образом, нарастание тесноты связи УВ с предшествующим объёмом выпавших осадков и синхронность этих рядов подтверждает выявленную разными авторами [3, 4] зависимость естественных колебаний УВ в озере от цикличности атмосферного увлажнения в бассейне – в данном случае от многолетних циклов муссонной циркуляции, которые, как показывают расчёты, длятся в среднем 6 лет и отражают интенсивность трендов нарастания или снижения сумм осадков и, соответственно, с задержкой влияют на УВ.

Анализ влияния гидрологических факторов. Связь среднегодового УВ в оз. Ханка с речным притоком только за какой-либо один год практически отсутствует, тогда как учёт суммарного притока за несколько предыдущих лет усиливает эту связь (таблица 4). Тесная связь УВ отмечается с суммарным речным притоком за период от 3 до 6 лет с максимальной корреляцией (0,81–0,82) за 5 лет. При разделении выборки на отдельные циклы водности (строки 3–6 таблицы 4) результат оказывается аналогичным анализу осадков: в циклах с границами по многоводным годам коэффициент корреляции УВ с притоком возрастает до 0,87–0,88, а в циклах с границами по маловодным годам корреляция нарушается.

По сравнению с суммами осадков, тесная связь УВ с суммарным притоком достигается за меньшие выборки лет (3–6 вместо 4–9), поскольку влияние речного стока на УВ проявляется в более короткие сроки за счёт действительно измеренного в замыкающем створе объёма притока (другими словами, вследствие потерь измеренного объёма осадков на испарение, транспирацию и пр. [32, 41]). Отсюда разностные интегральные кривые речного притока выглядят более сглаженными за тесно связанные выборки лет (рисунок 7) по сравнению с аналогичными для осадков (рисунок 6). Также синхронность кривых стока и УВ выстраивается несколько лучше за все суммарные выборки лет (кроме текущих) в отличие от кривых осадков и УВ.

Таблица 4. Коэффициенты корреляции между УВ в оз. Ханка и суммарным речным притоком с учётом предшествующих лет за период 1951–2020 гг. и отдельные циклы водности

Table 4. Correlation coefficients between the WL in Lake Khanka and the total river inflow, considering previous years for the period 1951-2020 and individual cycles of water content

Период, гг.	**∑Y₁**	**∑Y₂**	**∑Y₃**	**∑Y₄**	**∑Y₅**	**∑Y₆**	**∑Y₇**	**∑Y₈**	**∑Y₉**	**∑Y₁₀**
1951–2020	0,437	0,667	0,781	0,799	0,811	0,793	0,739	0,698	0,654	0,616
1971–2020	0,478	0,687	0,791	0,808	0,818	0,793	0,736	0,694	0,660	0,627
1955–1980	0,354	0,675	0,851	0,871	0,877	0,855	0,735	0,666	0,524	0,407
1981–2006	-0,077	0,186	0,412	0,581	0,694	0,759	0,760	0,693	0,687	0,633
1976–1995	0,136	0,500	0,772	0,845	0,870	0,799	0,651	0,514	0,465	0,403
1996–2016	0,566	0,687	0,772	0,839	0,879	0,864	0,769	0,680	0,610	0,553

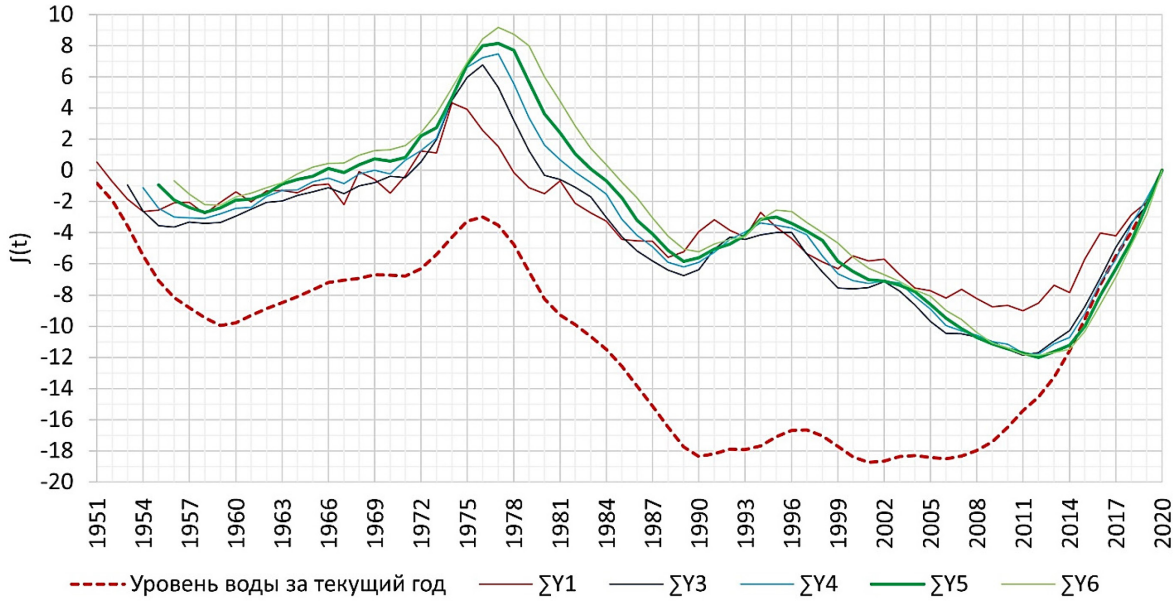


Рисунок 7. Разностные интегральные кривые УВ в оз. Ханка и суммарного речного притока с его водосбора за 1951–2020 гг.

Figure 7. Differential integral curves of the WL in Lake Khanka and the total river inflow from its catchment for 1951–2020

Тесная связь УВ и речного притока прослеживается с довольно малой выборки – 3 лет. Если ранее обнаружено, что основное влияние на УВ оказывает объём осадков, выпавших за предшествующие 6 лет, то тесная связь за первые несколько лет предположительно основывается на постепенной разгрузке в озеро накопившихся на водосборе ПВ. Это можно объяснить следующим образом. Помимо испарения и транспирации потери стока происходят также за счёт просачивания воды в почву и подземные водоносные горизонты. В силу меньшего объёма (относительно речного стока), неравномерного распределения по бассейну и медленной скорости стекания ПВ не успевают разгрузиться в озеро в течение всего лишь одного года. Стоит учитывать и удалённую от водоёма возвышенную периферию водосбора, являющуюся преимущественной областью питания ПВ бассейна озера, в связи с чем ПВ требуется немалое время миграции к зонам разгрузки.

Связь предшествующих сумм осадков, выпадающих на водосбор, с суммарным притоком и притоком отдельных рек в озеро по мере нарастания выборок лет уменьшается неравномерно (рисунок 8). Максимальная корреляция притока и осадков достигается за 1 год (0,70–0,86), что естественно, поскольку большая часть речного стока формируется осадками за короткие периоды и сезоны в пределах одного года. С нарастанием суммарных

выборок лет связь ослабевает, но происходит это 3-летними стадиями (ступенями), что тоже может указывать на вероятную разгрузку ПВ в течение этих 3-летних периодов. При этом бассейны отдельных рек оказываются близки по времени разгрузки ПВ. Таким образом предполагается, что накопившийся в течение трёх лет запас ПВ, постепенно разгружаясь, влияет на УВ в озере, что отражается как в 3-летней задержке отклика УВ на осадки и приток за текущий год (см. рисунки 6, 7), так и вполне согласуется с результатами прежних исследований [29].

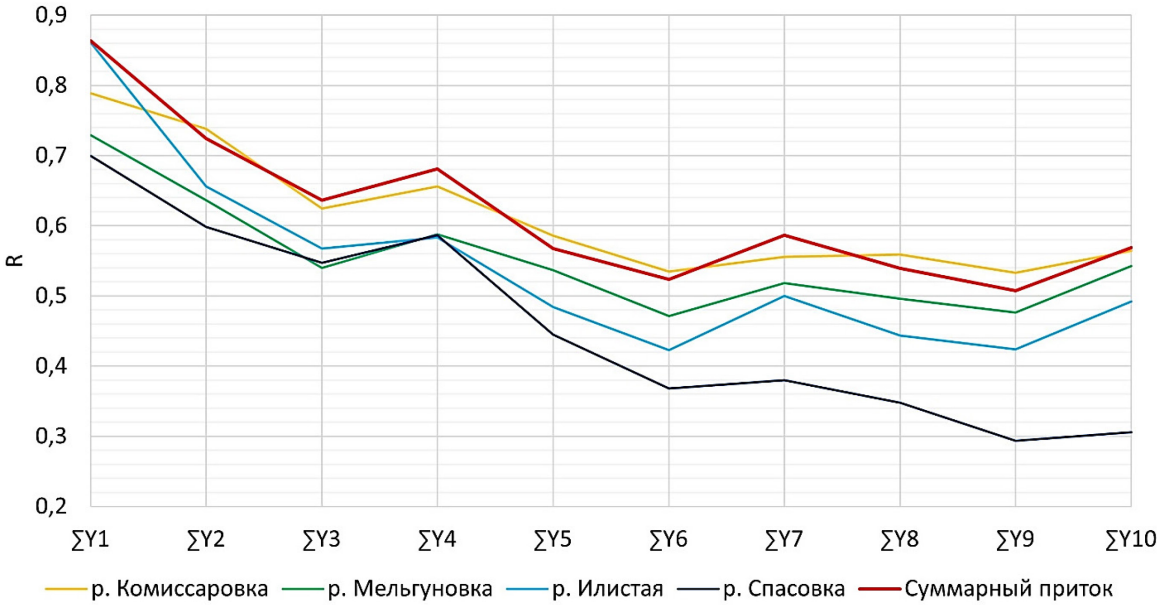


Рисунок 8. Коэффициенты корреляции между речным притоком в оз. Ханка и суммами осадков за нарастающие продолжительности предшествующих лет

Figure 8. Correlation coefficients between the river inflow in Lake Khanka and precipitation amounts for increasing durations of previous years

В проведённом анализе все данные были приведены к календарному, а не к гидрологическому году (для бассейна Ханки такой считается с декабря предыдущего по ноябрь текущего года). Использование последнего несколько уменьшало тесноту связи как осадков с речным притоком, так и УВ в озере с ними. Ухудшение связи можно объяснить тем, что, во-первых, подавляющая часть осадков на водосборе выпадает в летний период, а во-вторых, осадки и речной сток текущего года целиком не определяют средний УВ в озере того же года. Тем самым в многолетнем разрезе смещение границ расчётного года с календарного на гидрологический малозначимо влияет на результат расчёта.

Заключение

Характерные географические условия бассейна озера Ханка – преобладание равнинных ландшафтов с обширными водно-болотными угодьями, муссонный климат с континентальными чертами, развитость орошаемого земледелия – определяют специфику гидрологического режима озера и разнообразные факторы, влияющие на компоненты его водного баланса. В изучении этого режима остаётся ряд дискуссионных вопросов. Так, не до конца складывается единое мнение о причинах многолетних колебаний УВ в озере и их соотношении между собой, поскольку УВ контролируется множеством процессов, а вклад некоторых из них без соответствующих измерений подтвердить не представляется возможным. Это особенно касается подземного стока.

В работе выполнена статистическая оценка роли приходных составляющих водного баланса озера в формирование УВ и выявлены закономерности. Анализ показал, что за период с 1951 по 2020 гг. тесная связь между текущими среднегодовыми УВ и предшествующими суммами осадков отмечается в выборках от 4 до 9 лет, максимальная корреляция (0,82) – в 6-летних выборках, а в разностных интегральных кривых соответствующих рядов прослеживается

синхронность, но с 3-летней задержкой УВ по отношению к осадкам текущего года. По влиянию на УВ осадки, выпадающие на зеркало озера и на водосборы его притоков, оказываются сопоставимы по величине. Тем самым УВ в оз. Ханка во многом зависит от предшествующего увлажнения его водосбора, в общем определяемого режимом муссонной циркуляции, отдельные 6-летние фазы которой отражают разную интенсивность выпадения осадков. Связь УВ озера с осадками в бассейне р. Мулинхэ в годы сброса паводковых вод в озеро также статистически значима.

Связь между УВ и предшествующим суммарным объёмом речного притока отмечается для выборок от 3 до 6 лет с максимальной корреляцией (0,81) за 5 лет. Данная связь становится тесной раньше, чем с выборками лет осадков, что можно объяснить в том числе стоком ПВ и временем их разгрузки. Предполагается, что в течение 3 лет, после которых связь УВ с притоком становится высокой, происходит накопление подземного влагозапаса и его постепенная разгрузка в озеро, что заметно как в многолетней динамике УВ в озере с 3-летним откликом на осадки и приток за текущий год, так и в корреляции предшествующих сумм осадков с текущим речным притоком, которая с нарастанием продолжительности выборок нелинейно уменьшается в виде 3-летних стадий. Таким образом, продолжительная разгрузка ПВ в озеро вносит дополнительный вклад в колебания его УВ.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 25-47-00022).

Acknowledgments

The work is financially supported by the Russian Scientific Foundation (project 25-47-00022).

Литература / References

1. Трансграничное озеро Ханка: причины повышения уровня и экологические угрозы / Отв. ред. Ю.Н. Журавлёв, С.В. Клышевская. Владивосток: Дальнаука, 2016. 286 с.
   Transboundary Khanka Lake: causes of water rise and ecological threats. In Zhuravlev, Yu.N., and Klyshevskaya, S.V. (eds.). Vladivostok, Dalnauka, 2016. 286 p.
2. Трансграничное озеро Ханка: современное состояние и перспективы развития / Отв. ред. С.В. Клышевская, Т.В. Никулина. Владивосток: ФНЦ Биоразнообразия ДВО РАН, 2021. 296 с.
   Transboundary Khanka Lake: current state and prospects of development of the region. In Klyshevskaya, S.V., and Nikulina, T.V. (eds.). Vladivostok, Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity FEB RAS, 2021. 296 p.
3. Васьковский М.Г. Гидрологический режим озера Ханка. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 175 с.
4. Водный баланс озера Ханка и его изменения под влиянием природных и антропогенных факторов / Под ред. В.Ю. Георгиевского. СПб.: Государственный гидрологический институт, 2022. 272 с.
   The water balance of the Khanka Lake and its changes under the influence of natural and anthropogenic factors. In Georgievsky V.Y. (ed.). St. Petersburg, State Hydrological Institute, 2022. 272 p.
5. Ананьева Е.Е. Озеро Ханка: колебания уровня и их причины // Астраханский вестник экологического образования. 2016. № 4. С. 48–57.
   Ananyeva E.Ye. Lake Khanka: level fluctuations and their causes. Astrakhan Bulletin of Ecological Education, 2016, no. 4, pp. 48–57.
6. Бортин Н.Н., Горчаков А.М. Причины экстремально высокого уровня воды трансграничного озера Ханка // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2016. № 4. С. 62–84.
   Bortin N.N., Gorchakov A.M. The reasons for the extremely high water level of the transboundary Lake Khanka. Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management, 2016, no. 4, pp. 62–84.
7. Раков А.А. Колебания уровня воды в озере Ханка в связи с изменениями базиса эрозии рек Сунгача и Уссури // Трансграничное озеро Ханка: причины повышения воды и экологические угрозы. Владивосток: Дальнаука, 2016. С. 223–233.

Rakov A.A. Fluctuations in the water level in Lake Khanka due to changes in the erosion basis of the Sungacha and Ussuri rivers. Transboundary Khanka Lake: causes of water rise and ecological threats. Vladivostok, Dalnauka, 2016, pp. 223–233.

8. Xiangcan J., Pingyang Z. Lake Xingkai/Khanka. Experience and Lessons Learned Brief. World Lake Database International Lake Environment Committee (ILEC). Kusatsu, 2006, pp. 447–459. Available at: https://wldb.ilec.or.jp/Lake/ASI-220/datalist.
9. Pekel J.F., Cottam A., Gorelick N., Belward A.S. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. Nature, 2016, no. 540, pp. 418–422. DOI: https://doi.org/10.1038/nature20584.
10. Xiao F., Wang X., Fu C. Impacts of land use/land cover and climate change on hydrological cycle in the Xiaoxingkai Lake Basin. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2023, no. 47. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101422.
11. Баканов К.Г. Многолетний режим уровня озера Ханка. Автореф. дисс. … канд. тех. наук. М.: Институт водных проблем АН СССР, 1988. 20 с.
12. Diagnostic Analysis of the Lake Xingkai/Khanka basin (People's Republic of China and Russian Federation). In Nakamura T., Xiangcan J., Kachur A. et al. (eds.). Nairobi, UNEP, 2001. 136 p.
13. Чудаева В.А. Миграция химических элементов в водах Дальнего Востока. Владивосток: Дальнаука, 2002. 392 с.
14. Махинов А.Н., Ким В.И. Возможные причины колебаний уровня воды в озере Ханка // Трансграничное озеро Ханка: причины повышения воды и экологические угрозы. Владивосток: Дальнаука, 2016. С. 25–30.
Makhinov A.N., Kim V.I. Possible causes of fluctuations in the water level in Lake Khanka. Transboundary Khanka Lake: causes of water rise and ecological threats. Vladivostok, Dalnauka, 2016, pp. 25–30.
15. Бортин Н.Н., Горчаков А.М., Кролевецкая Ю.В. Последствия антропогенного преобразования в трансграничном бассейне озера Ханка // Озёра Евразии: проблемы и пути их решения: Материалы II Международной конференции. Казань: Академия наук Республики Татарстан, 2019. С. 40–46.
Bortin N.N., Gorchakov A.M., Kroleveckaja Y.V. Effects of anthropogenic transformation in a transboundary Lake Xingkai/Khanka basin. Lakes of Eurasia: Problems and Solutions. Proceeding of the Second International Conference, Kazan, 2019, pp. 40–46.
16. Журавлёв Ю.Н., Клышевская С.В. Проблема регулирования воды в бассейне озера Ханка (Приморский край) // Вестник ДВО РАН. 2015. № 5. С. 40–52.
Zhuravlev Yu.N., Klyshevskaya S.V. The problem of regulation of the water level in the pool of the Khanka Lake (Primorsky Territory). Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, 2015, no. 5, pp. 40–52.
17. Коломиец А.Г., Герасименко М.Д., Шестаков Н.В. GNSS наблюдения за движениями земной коры в бассейне озера Ханка // Трансграничное озеро Ханка: современное состояние и перспективы развития. Владивосток: ФНЦ Биоразнообразия ДВО РАН, 2021. С. 45–47.
Kolomiets A.G., Gerasimenko M.D., Shestakov N.V. GNSS observations of the Earth's crust movements in the Khanka Lake basin. Transboundary Khanka Lake: current state and prospects of development of the region. Vladivostok, Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity FEB RAS, 2021, pp. 45–47.
18. Современные возможности и перспективы прогнозирования гидрологического режима бассейна озера Ханка с помощью физико-математического моделирования / А.Н. Бугаец, Ю.Г. Мотовилов, Б.И. Гарцман, А.С. Калугин, Л.В. Гончуков, О.В. Соколов, Н.Л. Фролова, Л.В. Зотов, В.Ю. Григорьев, А.А. Соколов, С.М. Краснопеев, В.В. Шамов, В.И. Ознобихин // Трансграничное озеро Ханка: причины повышения воды и экологические угрозы. Владивосток: Дальнаука, 2016. С. 108–114.
Bugaets A.N., Motovilov Yu.G., Gartsman B.I., Kalugin A.S., Gonchukov L.V., Sokolov O.V., Frolova N.L., Zotov L.V., Grigoriev V.Yu., Sokolov A.A., Krasnopeev S.M., Shamov V.V., Oznobikhin V.I.

Modern possibilities and prospects of forecasting hydrological Lake Khanka basin regime using physical and mathematical modeling. Transboundary Khanka Lake: causes of water rise and ecological threats. Vladivostok, Dalnauka, 2016, pp. 108–114.

19. Георгиевский В.Ю., Шалыгин А.Л., Болгов М.В., Коробкина Е.А. Многолетние изменения уровня озера Ханка и проблемы его регулирования // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2017. № 3. С. 69–88. DOI: 10.35567/1999-4508-2017-3-5.
Georgievsky V.Y., Shalygin A.L., Bolgov M.V., Korobkina E.A. Long-term changes in the level of Lake Khanka and problems of its regulation. Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management, 2017, no. 3, pp. 69–88. DOI: 10.35567/1999-4508-2017-3-5.
20. К вопросу о колебаниях уровня озера Ханка / Ю.Н. Журавлёв, С.В. Клышевская, П.А. Новикова, М.А. Гузев, Е.Ю. Никитина, Я.О. Тимофеева // Вестник ДВО РАН. 2018. № 4. С. 88–94.
Zhuravlev Yu.N., Klyshevskaya S.V., Novikova P.A., Guzev M.A., Nikitina E.Y., Timofeeva Ya.O. Study of the Khanka Lake fluctuations. Vestnik of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 2018, no. 4, pp. 88–94.
21. Сперанская Н.А., Фуксова Т.В. Многолетние изменения основных составляющих водного режима озера Ханка // Метеорология и гидрология. 2018. № 8. С. 53–64. DOI: 10.3103/S1068373918080058.
Speranskaya N.A., Fuksova T.V. Long-term changes in the main components of the water regime of Lake Khanka. Russian Meteorology and Hydrology, 2018, vol. 43, no. 8, pp. 530–538. DOI: 10.3103/S1068373918080058.
22. Балонишникова Ж.А., Цыценко К.В., Крамарева Л.С. Использование водных ресурсов в бассейне озера Ханка // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2019. № 3. С. 38–70. DOI: 10.35567/1999-4508-2019-3-3.
Balonishnikova J.A., Tsytsenko K.V., Kramareva L.S. Water resources use in the basin of the Lake Khanka. Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management, 2019, no. 3, pp. 38–70. DOI: 10.35567/1999-4508-2019-3-3.
23. Зуенко Ю.И., Шаповалов М.Е., Курносова А.С. Современные изменения уровня озера Ханка и их последствия для промысловых ресурсов // Известия ТИНРО. 2020. № 4. С. 935–350. DOI: 10.26428/1606-9919-2020-200-935-950.
Zuenko Y.I., Shapovalov M.E., Kurnosova A.S. Recent changes of water level in Lake Khanka and their consequences for its fisheries resources. Izvestiya TINRO, 2020, no. 4, pp. 935–950. DOI: 10.26428/1606-9919-2020-200-935-950.
24. Махинов А.Н. Озеро Ханка: подъём уровня воды, его масштабы и последствия // Природа. 2020. № 11. С. 37–45. DOI: 10.7868/S0032874X20110046.
Makhinov A.N. Lake Khanka: rise in water level, its scale and consequences. Priroda, 2020, no. 11, pp. 37–45. DOI: 10.7868/S0032874X20110046.
25. Болгов М.В., Коробкина Е.А. Оценка характеристик уровенного режима трансграничного озера Ханка в результате реализации проектных решений по расчистке истока реки Сунгача // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2022. № 2. С. 53–67. DOI: 10.35567/19994508_2022_2_5.
Bolgov M.V., Korobkina E.A. Assessment of the characteristics of the level regime of the transboundary Lake Khanka as a result of the implementation of project solutions for clearing the source of the Sungacha River. Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management, 2022, no. 2, pp. 53–67. DOI: 10.35567/19994508_2022_2_5.
26. Рынков В.С. Подземные воды Дальнего Востока: учеб. пособие. Владивосток: ДВПИ, 1988. 88 с.
27. Караванов К.П. Подземные воды как источник водоснабжения в Приморском крае: препринт. Хабаровск: Институт водных и экологических проблем ХНЦ ДВО РАН, 1995. 37 с.
28. Росликова В.И., Рыбачук Н.А., Короткий А.М. Атлас почв юга Дальнего Востока России (Приханкайская низменность). Владивосток: Дальнаука, 2010. 247 с.

29. Bugaets A.N., Lupakov S.Yu., Gonchukov L.V., Shamov V.V. Analysis of the relationship between the dynamics of genetic components of river flow and water levels of Lake Khanka. Water Resources, 2025, no. 5. pp. 843–852. DOI: 10.1134/S0097807824605776.
30. Iwaki M., Yamashiki Y., Toda T., Jiao C., Kumagai M. Estimation of the Average Retention Time of Precipitation at the Surface of a Catchment Area for Lake Biwa. Water, 2021, no. 13(12). DOI: 10.3390/w13121711.
31. Harris I., Osborn T.J., Jones P.D., Lister D.H. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. Scientific Data, 2020, no. 7. DOI: 10.1038/s41597-020-0453-3.
32. Владимиров А.М. Гидрологические расчёты: учебник. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. 366 с.
33. Методические рекомендации по определению расчётных гидрологических характеристик при недостаточности данных гидрометрических наблюдений / Государственный гидрологический институт. СПб., 2004. 67 с.
34. Методические рекомендации по оценке однородности гидрологических характеристик и определению их расчётных значений по неоднородным данным / Государственный гидрологический институт. СПб.: Нестор-История, 2010. 162 с.
35. Дружинин В.С., Сикан А.В. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации: учебное пособие. СПб.: Изд-во РГГМУ, 2001. 168 с.
36. Moriasi D.N. Model evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. Transactions of the ASABE, 2007, no. 3(50), pp. 885–900. DOI: 10.13031/2013.23153.
37. Борщ С.В., Христофоров А.В. Оценка качества прогнозов речного стока // Труды гидрометеорологического научно-исследовательского центра РФ. 2015. Вып. 355. 200 с.
Borsch S.V., Khristoforov A.V. Hydrologic flow forecast verification. Proceedings of the Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation, 2015, vol. 355, 200 p.
38. Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Эффективность моделирования и прогнозирования речного стока // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 1 (375). С. 176–189. DOI: 10.37162/2618-9631-2020-1-176-189.
Borsch S.V., Simonov Y.A., Khristoforov A.V. Efficiency of streamflow modeling and forecasting. Hydrometeorological Studies and Forecasts, 2020, vol. 375, no. 1, pp. 176–189. DOI: 10.37162/2618-9631-2020-1-176-189.
39. Лучшева А.А. Практическая гидрология: учеб. пособие. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 440 с.
40. Zhongpei L., Xiaoqing L., Zhipeng H., Runxiang C., Yuping H., Lin W. Time lag effect of precipitation on groundwater level based on wavelet analysis in the People's Victory Canal irrigation area, China. Scientific Reports, 2025, no. 15, 13 p. DOI: 10.1038/s41598-025-96644-w.
41. Выручалкина Т.Ю., Филатов Н.Н., Дианский Н.А., Гусев А.В. О прогнозе многолетних изменений уровня воды крупных озёр // Труды Карельского научного центра РАН. 2016. № 9. С. 3–16. DOI: 10.17076/lim480.
Vyruchalkina T.Yu., Filatov N.N., Diansky N.A., Gusev A.V. On forecasting long-term variations of water level in large lakes. Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2016, no. 9, pp. 3–16. DOI: 10.17076/lim480.

Поступила в редакцию / Received 14.11.2025
Принята к публикации / Accepted 16.12.2025

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шайгузов Руслан Станиславович, ведущий инженер, Тихоокеанский институт географии ДВО РАН (ТИГ ДВО РАН), г. Владивосток, Россия, SPIN: 7093-9888, https://orcid.org/0009-0001-3246-0955, e-mail: rus-shaiguzov@inbox.ru.

Шамов Владимир Владимирович, доктор географических наук, главный научный сотрудник,

Тихоокеанский институт географии ДВО РАН (ТИГ ДВО РАН), г. Владивосток, Россия, SPIN: 4913-0239, https://orcid.org/0000-0001-9310-1836, e-mail: vlshamov@yandex.ru.
Лупаков Сергей Юрьевич, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, Тихоокеанский институт географии ДВО РАН (ТИГ ДВО РАН), г. Владивосток, Россия, SPIN: 9365-4537, https://orcid.org/0000-0002-5804-2604, e-mail: rbir@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ruslan S. Shaiguzov, Leading Engineer, Pacific Geographical Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia, SPIN-code: 7093-9888, https://orcid.org/0009-0001-3246-0955, e-mail: rus-shaiguzov@inbox.ru.
Vladimir V. Shamov, D.Sc. (Geography), Chief Researcher, Pacific Geographical Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia, SPIN-code: 4913-0239, https://orcid.org/0000-0001-9310-1836, e-mail: vlshamov@yandex.ru.
Sergey Yu. Lupakov, Ph.D (Geography), Leading Researcher, Pacific Geographical Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia, SPIN: 9365-4537, https://orcid.org/0000-0002-5804-2604, e-mail: rbir@mail.ru.

Научная статья / Scientific paper
УДК: 656.62:[551.501+556.044](282.256.6)
DOI: 10.34753/HS.2025.7.4.355

Оценка современных изменений сроков физической навигации на реке Лена

М. С. Дрегваль, Е.В. Гайдукова, А.А. Батмазова, И.О. Винокуров
Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ), г. Санкт-Петербург, Россия
e-mail: msdregval@mail.ru

Аннотация. Рассматривается изменение периода физической навигации на судоходной реке Лена с начала гидрометрических наблюдений до настоящего времени. В статье приведены результаты статистической обработки рядов наблюдений за климатическими и гидрологическими характеристиками на реке Лена. Отмечается повышение среднегодовой температуры воздуха, а также повышение температур воздуха за отдельные месяцы в начале периода навигации: за апрель, май и июнь. Также выявлено увеличение продолжительности навигации по всей длине исследуемой реки, которое, в подавляющем большинстве случаев, происходит за счет более раннего начала навигации весной. Значимость работы определяется ключевой ролью речного транспорта для экономики и логистики Якутии, что требует оценки влияния климатических изменений на продолжительность навигационного периода.

В задачи исследования входило выявление и количественный анализ многолетних тенденций в датах начала, окончания и общей длительности навигационного периода на реке Лена и установления их связи с климатическими показателями. В основу расчетной части положен статистический анализ рядов гидрометрических наблюдений на ключевых постах в верхнем, среднем и нижнем течениях реки. Анализировались даты устойчивого вскрытия и замерзания, рассчитывалась длительность периода свободного русла и его связь с климатическими характеристиками.

Проведенный анализ показал статистически значимое увеличение продолжительности навигации на всех рассматриваемых участках реки. Установлено, что сдвиг сроков в среднем составляет от 5 до 10 дней за изученный период, при этом основной вклад вносит более раннее вскрытие реки в весенний период. Изменение дат осеннего ледостава выражено слабее.

Ключевой вывод заключается в том, что наблюдаемое потепление климата в бассейне реки Лена уже оказывает существенное влияние на гидрологический режим, удлиняя период навигации, преимущественно за счет сдвига в весенний период.

Полученные результаты исследования можно использовать при прогнозировании сроков навигации.

Ключевые слова: изменение климата; навигационный период; река Лена; статистическая обработка временных рядов; значимость линейных трендов; однородность.

Для цитирования: Дрегваль М. С., Гайдукова Е.В., Батмазова А.А., Винокуров И.О. Оценка современных изменений сроков физической навигации на реке Лена // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2025. Т. 7. Вып. 4. С. 355–366. DOI: 10.34753/HS.2025.7.4.355.

Assessment of Modern Changes in the Navigation Season Timing on the Lena River

Maria S. Dregval, Ekaterina V. Gaidukova, Anna A. Batmazova, Igor O. Vinokurov
Russian State Hydrometeorological University (RSHU), St. Petersburg, Russia
e-mail: msdregval@mail.ru

Abstract. This article examines changes in the physical navigation period on the Lena River from the beginning of hydrometric observations to the present. The article presents the results of statistical processing of climatic and hydrological time series for the Lena River. An increase in the average annual air temperature is noted, along with rising air temperatures for individual months at the start of the navigation season: April, May, and June. An increase in the duration of navigation along the entire length of the studied river is also revealed, which is predominantly driven by earlier spring ice breakup. The significance of this study is determined by the key role of river transport for the economy and logistics of Yakutia, requiring a comprehensive assessment of climate change impact on the duration of the navigation period.

The objectives of the study included identifying and quantitatively analyzing long-term trends in the start, end, and total duration of the navigation period on the Lena River and establishing their relationship with climatic indicators. The calculations are based on a statistical analysis of hydrometric observation series at key stations in the upper, middle, and lower reaches of the river. The dates of stable ice breakup and freeze-up were analyzed, and the duration of the free-flowing period and its relationship with climatic characteristics were calculated.

The analysis revealed a statistically significant increase in navigation periods in all river sections under consideration. The shift in dates was found to average 5 to 10 days over the studied period, with the main contribution coming from earlier ice breakup in spring. The change in autumn ice formation dates was less pronounced.

The key conclusion is that the observed climate warming in the Lena River basin is already having a significant impact on the hydrological regime, extending the navigation period, primarily due to a shift in the spring. The results of this study can be used to forecast navigation periods.

Keywords: climate change; navigation period; Lena River; statistical time series processing; significance of linear trends; homogeneity.

For citation: Dregval M.S., Gaidukova E. V., Batmazova A.A., Vinokurov I. O. Assessment of modern changes in the timing of Navigation Season on the Lena River. Hydrosphere. Hazard processes and phenomena, 2025, vol. 7, iss. 4, pp. 355–366. DOI: 10.34753/HS. 2025.7.4.322. (In Russian; abstract in English).

Введение

Актуальность исследования связана с двумя аспектами использования водных транспортных путей России. Первый аспект концентрируется на развитии Северного морского пути, для которого Арктические участки судоходных рек стали частью транспортной системы. Основным документом, регламентирующим развитие этих участков, является «Стратегия развития внутреннего водного транспорта Российской Федерации на период до 2030 года»[1] [1]. Развитие Северного морского пути в Арктике требует анализа не только физического состояния ледостава, но и его пространственно-временной динамики для разработки эффективных и безопасных навигационных стратегий.

Второй аспект затрагивает экономическую составляющую в функционировании речной транспортной инфраструктуры, которая связывает районы Якутии транспортной артерией – рекой Лена. Именно по р. Лена происходит основная часть «северного завоза».

Даты наступления, прекращения ледовых явлений и продолжительность навигации на реке Лена являются важнейшими характеристиками, определяющими возможности социально-экономического развития ее бассейна. Ледостав влияет на экосистемы и климат, играет ключевую роль в безопасности и эффективности морских и речных перевозок.

Пространственно-временная изменчивость сроков установления ледостава в различных физико-географических условиях в последние десятилетия вызывает растущий интерес среди ученых, как в области климатических изменений, так и в области навигации. В условиях глобальных изменений климата, наблюдаемых в последнее время, возникает необходимость более глубокого понимания этих изменений и их последствий для навигации.

Так, в работе [2] проанализирована пространственно-временная изменчивость характеристик ледового режима рек, впадающих в Белое и Баренцево моря; показано, что происходящие изменения являются результатом сложного взаимодействия метеорологических и гидрологических условий. В работе [3] в результате статистического анализа характеристик ледового режима рек западного побережья Белого моря выявлены общие закономерности многолетней изменчивости

[1] Стратегия развития внутреннего водного транспорта Российской Федерации на период до 2030 года: утв. распоряжением Правительства РФ от 29 февраля 2016 г. № 327-р // Минтранс России: сайт. URL: https://mintrans.gov.ru/documents/8/8910 (дата обращения 22.04.2024).

процессов формирования ледового режима наряду с произошедшими климатическими изменениями. Рассматривая ледовый режим рек на территории республики Саха за период с 1950 по 2027 гг. [4] выявлены значимые изменения сроков ледостава и вскрытия, обусловленные современным потеплением климата. Наблюдается сокращение продолжительности ледостава в среднем на 1-2 недели, происходящее преимущественно за счет более раннего вскрытия рек. Даты начала ледостава, напротив, смещаются на более поздние сроки, но это изменение статистически менее значимо. В статье [5] были исследованы явления, вызванные сочетанием морфометрических особенностей русла и изменения метеорологических условий. Авторами выявлены тенденции роста зимних осадков и изменения температурного режима, которые указывают на необходимость постоянного мониторинга и периодического уточнения расчетных гидрологических характеристик для данного региона. В работе [6] описаны основные этапы развития исследований ледового режима рек Арктической зоны России в XX веке, включая становление системы мониторинга, развитие методов ледовых прогнозов и оценку влияния климатических изменений и антропогенных факторов на его формирование. Особое влияние уделяется современным перспективным направлениям, таким как использование космических снимков для анализа ледовой обстановки, разработка новых подходов к прогнозированию опасных ледовых явлений и исследование роли ледового режима в климатической обстановке региона.

В исследовании анализируется период физической навигации – интервал времени от начала очищения водного пути ото льда до начала устойчивого ледообразования[2].

Целью данной статьи является исследование изменения продолжительности физической навигации на разных участках реки Лена в условиях изменения климата.

Исходные данные и методы исследования

Длина р. Лена составляет 4400 км, площадь водосборного бассейна 2 488 тыс. км^2. Река берет начало на высоте 1470 м над уровнем моря на склонах Байкальского хребта. Устье реки – важный транспортный узел Сибири, где расположен один из портов Северного морского пути (порт Тикси).

Лена протекает в суровых по климатическим условиям районах. Практически весь ее бассейн расположен в регионах вечной мерзлоты Якутии и Иркутской области. Лена соединяет 6 крупных городов: Якутск, Усть-Кут, Киренск, Ленск, Олёкминск и Покровск. Остальные населенные пункты, расположенные на реке, имеют статус деревень и небольших поселений, а расстояния между ними могут достигать сотен километров.

По характеру течения реку Лена обычно делят на 3 крупных участка: верхний – от истока до устья реки Витим (протяженность 1690 км), средний – от устья реки Витим до впадения реки Алдан (1400 км) и нижний – от устья реки Алдан до о. Столб (1310 км).

Водность реки Лены велика – ее средний годовой расход у села Кюсюр (замыкающий створ в нижнем течении) составляет 16600 м^3/с. Питание реки Лены смешанное – снеговое и дождевое, с небольшим преобладанием одного из видов в зависимости от участка реки. В верхнем течении соотношение между сезонными долями стока сильно изменяется в зависимости от метеорологических условий года. Весенний сток (май–июнь) составляет 25–50 % его годовой величины, летне-осенний (июль–октябрь) 30–60 %. На зимнее полугодие приходится 10–25 %. В среднем течении, после впадения рек Витима и Олёкмы, питающихся преимущественно дождевыми водами, летне-осенний сток увеличивается, но в отдельные годы он и здесь может быть меньше весеннего. Доля стока за зимний период равна 9–11 % его

[2] Межгосударственный стандарт ГОСТ 26775-97 «Габариты подмостовые судоходных пролетов мостов на внутренних водных путях. Нормы и технические требования» (введен в действие постановлением Госстроя РФ от 29 июля 1997 г. N 18-42).

годового объема, она меньше, чем на верхнем участке. В нижнем течении основным является снеговое питание. В верхнем и среднем течении, где значительную роль играют подземные воды, доля стока за зимний период снижается до 6–7 %. При этом сток за май–июнь составляет обычно 50–70 %, доля же стока за зимнее полугодие снижается до 6–7 % его годового объема.

Для анализа динамики температуры воздуха и ледовых характеристик были использованы данные семи метеорологических станций (многолетние ряды среднегодовых и среднемесячных температур воздуха) и девяти гидрологических постов, равномерно расположенных на верхнем, среднем и нижнем участках р. Лена (см. рисунке 1).



Рисунок 1. Схема расположения метеорологических станций и гидрологических постов на участках реки Лена

Figure 1. Layout of meteorological stations and hydrological posts along the Lena River

Таблица 1. Характеристики рядов наблюдений
Table 1. Characteristics of observation series

Гидрологические посты				
№	**Гидрологический пост**	**Расстояние от устья, км**	**Период наблюдений, гг.**	**Длина ряда, лет**
1	р.п. Пеледуй	2693	1945–2019	75
2	г. Ленск	2508	1962–2019	58
3	Олекминск	2103	1949–2019	71
4	Саныяхтат	1885	1949–2019	71
5	г. Якутск	1491	1945–2019	75
6	п. Сангар	1177	1945–2019	75
7	с. Жиганск	754	1945–2019	75
8	гм.ст. Джарджан	512	1945–2019	75
9	с. Кюсюр	211	1945–2019	75

Метеостанции			
№	**Метеостанция**	**Период наблюдения, гг.**	**Длина ряда, лет**
1	Витим	1944–2020	77
2	Ленск	1944–2020	77
3	Олекминск	1944–2020	77
4	Якутск	1944–2020	77
5	Жиганск	1944–2020	77
6	Джарджан	1944–2020	77
7	Кюсюр	1945–2020	76

Исходная информация по ледовым характеристикам была взята из гидрологических ежегодников, а также с сайта АИС ГМВО (2008–2019 гг.)[3]. Метеорологическая информация была полностью получена из архивов ВНИИГМИ-МЦД, которые находятся в свободном доступе на сайте организации[4].

Для оценки изменения продолжительности навигации использовались ряды дат начала и окончания ледостава и рассчитанные ряды продолжительности физической навигации за период с начала наблюдений до 2019 г. (рисунок 1, таблица 1).

Гидрометеорологические ряды обрабатывались методами статистики: проверка на однородность, выявление значимого тренда, построение нормированных суммарных кривых.

Результаты исследования

Многолетние ряды среднегодовых температур воздуха и температур воздуха за май (месяц начала навигации) были использованы для построения хронологических графиков и проверки рядов на однородность (по среднему значению и по дисперсии), а также на наличие тренда.

В результате установлено, что ряды являются неоднородными по критерию Стьюдента и имеют значимый положительный тренд (при 5 % уровне значимости) (таблица 2).

[3] Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО). – URL: https://gmvo.skniivh.ru/index.php (дата обращения 28.04.2023).

[4] Специализированные массивы для климатических исследований. – URL: http://aisori-m.meteo.ru/waisori/index0.xhtml (дата обращения 28.02.2024).

Таблица 2. Результаты проверки многолетних рядов температуры воздуха на однородность и наличие тренда

Table 2. Results of testing long-term air temperature series for homogeneity and the presence of a trend

Метеостанция	Среднегодовые температуры воздуха			Температура воздуха за май		
	критерий Стьюдента	критерий Фишера	значимость тренда	критерий Стьюдента	критерий Фишера	значимость тренда
Витим	+	–	значим	+	+	значим
Ленск	+	–	значим	+	–	значим
Олекминск	+	–	значим	+	–	значим
Якутск	+	+	значим	+	–	значим
Жиганск	+	–	значим	+	–	значим
Джарджан	+	–	значим	+	–	значим
Кюсюр	+	–	значим	+	–	значим
«+» – ряд неоднороден; «–» – ряд однороден						

Продолжительность физической навигации определялась как разница между датами начала и окончания ледостава. Полученные многолетние ряды двух указанных ледовых характеристик были проверены на однородность по критериям Стьюдента, Фишера и на значимость линейных трендов при уровне значимости $2\alpha = 5\,\%$ [5] (таблица 3). Кроме того, была проанализирована динамика дат начала и окончания ледовых явлений, которые для этого были переведены в количественные величины – в число суток от постоянного начала (с 1 января каждого года).

Таблица 3. Результаты проверки многолетних рядов ледовых характеристик на однородность и наличие тренда

Table 3. Results of testing long-term series of ice characteristics for homogeneity and the presence of a trend

Гидрологический пост	Продолжительность физической навигации, дней			Окончание ледовых явлений, дата			Начало ледовых явлений, дата		
	критерий Фишера	критерий Стьюдента	значимость тренда	критерий Фишера	критерий Стьюдента	значимость тренда	критерий Фишера	критерий Стьюдента	значимость тренда
р.п. Пеледуй	–	–	не значим	–	+	значим	–	–	не значим
г. Ленск	–	+	значим	–	+	значим	–	–	не значим
Олекминск	–	+	значим	–	–	не значим	–	–	не значим
Саныяхтат	–	+	значим	–	+	значим	–	–	не значим
г. Якутск	+	+	значим	–	+	значим	+	+	значим
п. Сангар	–	+	значим	–	+	значим	–	–	не значим
с. Жиганск	–	+	значим	–	+	значим	–	–	не значим
гм.ст. Джарджан	–	+	значим	–	+	значим	–	–	не значим
с. Кюсюр	–	+	значим	–	+	значим	–	–	не значим
«+» – ряд неоднороден; « – » – ряд однороден									

[5] Методические рекомендации по оценке однородности гидрологических характеристик и определению их расчетных значений по неоднородным данным. – СПб: Нестор-История, 2010.– 162 с.

Таким образом, из 27 рассмотренных рядов ледовых характеристик более 60 % из них являются неоднородными по критерию Стьюдента.

Для выявления точек нарушения стационарности рядов температуры воздуха и ледовых характеристик строились нормированные суммарные кривые [7]:

$$\sum_{i=T_н}^{T} \frac{x_i - x_{\min}}{\sigma_x} = f(T), \qquad (1)$$

где x_i – значение исследуемой характеристики в i-ом году; $x_{\min}$ – минимальное значение характеристики за рассматриваемый период; σ_x – стандартное отклонение ряда x; T – время (годы); $T_н$ – год начала наблюдений.

Было установлено, что точка перелома на суммарных кривых приходится на начало 1990-х гг. (таблица 4).

Отмечается повышение среднегодовой температуры воздуха, а также повышение температуры воздуха в месяцах начала периода навигации: апреле, мае и июне. В качестве примера на рисунке 2 представлены нормированные суммарные кривые среднемноголетних годовых температур воздуха и температур воздуха за май месяц по данным метеостанций Кюсюр, Жиганск и Ленск.

Таблица 4. Годы перелома в многолетних рядах температуры воздуха и периода физической навигации

Table 4. Turning points in long-term air temperature series and the period of physical navigation

Участок реки	Метеостанция на участке	Год перелома среднегодовой температуры воздуха	Гидрологический пост на участке	Год перелома продолжительности физической навигации
г. Киренск – устье р. Витим	Витим	1983	р.п. Пеледуй	1986
устье р. Витим – устье р. Нюя	Ленск	1990	г. Ленск	1992
устье р. Нюя – устье р. Олекма	Олекминск	1990	Олекминск	1990
			Саныяхтат	1983
устье р. Олекма – г. Якутск	Якутск	1985	г. Якутск	1984
			п. Сангар	1987
г. Якутск – г. Жиганск	Жиганск	1990	с. Жиганск	1988
г. Жиганск – Быков Мыс	Джарджан	2000	гм.ст. Джарджан	1999
	Кюсюр	1989	с. Кюсюр	1989

Примеры хронологических графиков, построенных на основании многолетних рядов данных о продолжительности физической навигации (с наличием тренда) и нормированные суммарные кривые представлены на рисунке 3.

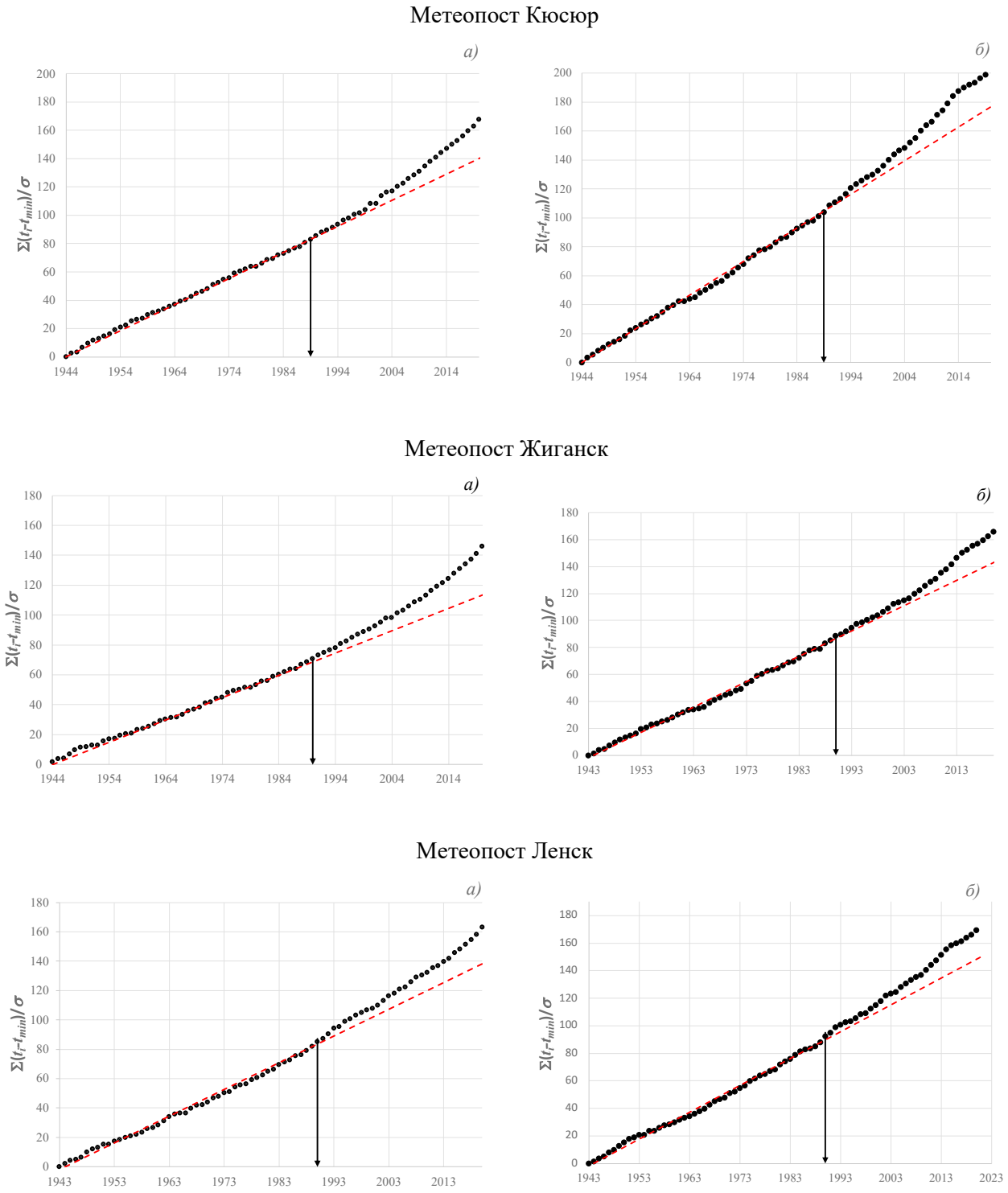


Рисунок 2. Нормированные суммарные кривые среднегодовых температур воздуха (а) и температур воздуха за май (б) по метеостанциям Кюсюр, Жиганск и Ленск

Figure 2. Normalized summary curves of average annual air temperatures (a) and air temperatures for May (b) at the meteorological stations of Kyusyur, Zhigansk and Lensk

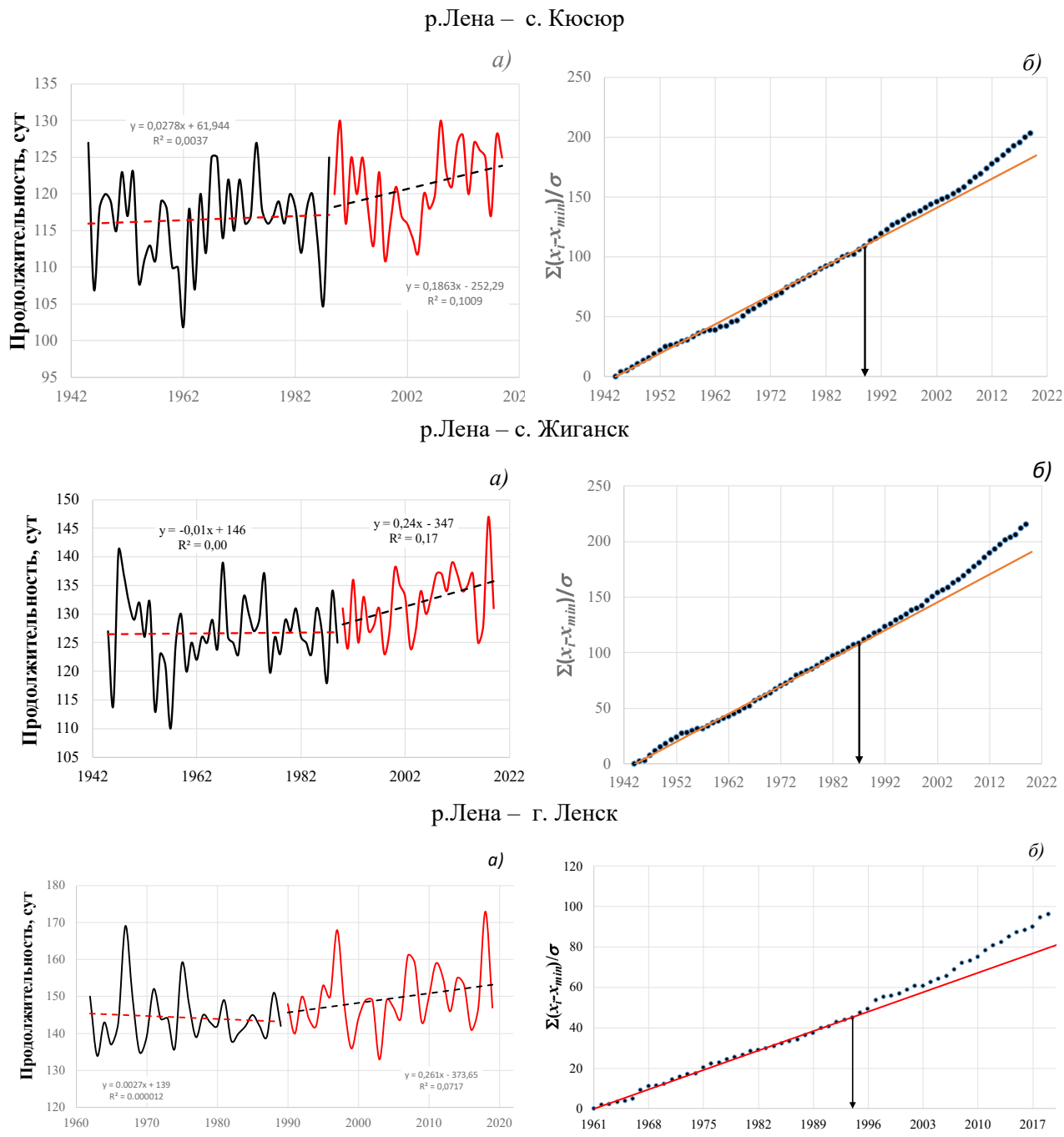


Рисунок 3. Хронологические графики продолжительности физической навигации (а) и интегральные кривые (б) на постах с. Кюсюр, с. Жиганск и г. Ленск

Figure 3. Chronological graphs of the duration of physical navigation (a) and integral curves (b) at the posts of the villages of Kyusyur, Zhigansk and the city of Lensk

В среднем на выбранных постах исследуемого района в современных условиях, ледостав заканчивается на 5 суток раньше и устанавливается на 4 суток позже, чем в предшествующие периоды (до точки перелома). Исключением является гидрологический пост Якутск, где ледовый режим реки подвержен антропогенному воздействию [8, 9]. Выявленные изменения продолжительности физической навигации в сторону ее увеличения связаны с ростом температур воздуха в бассейне р. Лены.

Средние даты появления и окончания ледовых явлений и средние значения продолжительности физической навигации на разных участках р. Лена представлены в таблице 5.

Таблица 5. Средние даты появления и окончания ледовых явлений и средние значения продолжительности физической навигации на реке Лена в различные периоды

Table 5. Average dates of the appearance and end of ice phenomena and average values of the duration of physical navigation on the Lena River in different periods

Гидрологический пост	Средняя дата окончания ледовых явлений за период			Средняя дата появления ледовых явлений за период			Продолжительность физической навигации за период		
	до года перелома	после года перелома	разница в днях	до года перелома	после года перелома	разница в днях	до года перелома	после года перелома	разница в днях
р.п. Пеледуй	21 мая	19 мая	2	15 октября	16 октября	1	147	150	3
г. Ленск	22 мая	22 мая	0	14 октября	19 октября	5	145	150	5
г. Олекминск	18 мая	13 мая	5	8 ноября.	12 ноября	4	174	183	9
с. Саныяхтат	28 мая	26 мая	2	8 октября	12 октября.	4	132	139	7
г. Якутск	*29 мая*	*20 мая*	*9*	*12 октября*	*27 октября*	*15*	*136*	*160*	*24*
п. Сангар	31 мая	27 мая	4	10 октября	12 октября	2	132	138	6
с. Жиганск	3 июня	31 мая	3	8 октября	10 октября	2	126	132	6
гм. ст. Джарджан	8 июня	5 июня	3	4 октября	6 октября	2	118	123	5
с. Кюсюр	12 июня	9 июня	3	7 октября	8 октября	1	116	120	4
Среднее			3			4			8

Выводы

Продолжительный навигационный период на реке Лена имеет существенное экономическое значение для Российской Федерации, способствуя развитию транспортной инфраструктуры, увеличению объемов перевозок и снижению логистических издержек.

Исследование изменений сроков навигации на реке Лене позволяет прогнозировать параметры физической навигации [10] и разрабатывать эффективные стратегии управления транспортными потоками в регионе.

Установлено, что в районах верхнего, среднего и нижнего течения р. Лена в последние тридцать лет наблюдается рост среднегодовой температуры воздуха и температуры воздуха за май месяц. Изменение климатических условий в сторону потепления примерно произошло на уровне 1990 г.

Указанные климатические изменения привели к смещению дат начала и окончания ледостава. На большинстве гидрологических постов ледостав в последние 30 лет устанавливается на 4 суток позже и заканчивается на 3 суток раньше. Продолжительность физической навигации увеличилась в среднем на 7 суток. В современных условиях продолжительность физической навигации на реке Лена в среднем составляет от 120 суток (р. Лена – с. Кюсюр) до 183 суток (р. Лена – г. Олекминск).

Исходя из результатов исследования, можно сделать вывод, что выявленные климатические изменения оказывают влияние на сроки навигации. Сокращение периода формирования ледового покрова снижает стабильность условий судоходства, увеличивает риски для судовладельцев и требует принятия соответствующих мер для обеспечения безопасности и эффективности речного транспорта.

Благодарности

Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки РФ № FSZU-2023-0002.

Acknowledgements

The work was carried out as part of the state assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation No. FSZU-2023-0002.

Литература / References

1. Бурылина Д.И. Современное состояние водного транспорта и проблемы его развития // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2018. Т. 2, №4(14). С. 666–668.
   Buryrina D.I. Modern state of water transport and problems of its development. Actual problems of aviation and cosmonautics, 2018, vol. 2, no. 4(14), pp. 666–668. (In Russian).
2. Агафонова С.А., Фролова Н.Л. Ледовый режим рек севера Европейской части России // Меняющийся климат и социально-экономический потенциал российской Арктики. М.: Лига-Вент, 2015. С. 35–47.
   Agafonova S.A., Frolova N.L. Ice regime of the rivers in the north of the European part of Russia. In: Changing climate and socio-economic potential of the Russian Arctic. Moscow: Liga-Vent, 2015, pp. 35–47 (In Russian).
3. Баклагин В.Н., Махальская Н.И. Многолетняя изменчивость характеристик ледового режима в устьевых областях рек западного побережья Белого моря на фоне климатических изменений // Лёд и снег. 2024. Т. 64. №2. С. 281–292. DOI: 10.31857/S2076673424020111.
   Baklagin V.N., Makhalskaya N.I. Long-term variability of ice regime characteristics in the estuarine areas of the White Sea western coast rivers against the background of climate change. Ice and Snow, 2024, vol. 64, no. 2, pp. 281–292. DOI: 10.31857/S2076673424020111. (In Russian; abstract in English).
4. Лобанов В.А., Горошкова Н.И. Характеристики ледового режима рек Республики Саха (Якутия) и их климатические изменения // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2019. №55. С. 86–98. DOI: 10.33933/2074-2762-2019-55-86-98.
   Lobanov V.A., Goroshkova N.I. Characteristics of the ice regime of the rivers of the Republic of Sakha (Yakutia) and their climatic changes. Scientific Notes of the Russian State Hydrometeorological University, 2019, no. 55, pp. 86–98. DOI: 10.33933/2074-2762-2019-55-86-98. (In Russian; abstract in English).
5. Рождественский А.В., Бузин В.А., Лобанов В.А. Исследование условий формирования и расчеты максимальных уровней воды на р. Лена у г. Ленск // Метеорология и гидрология. 2003. №2. С. 68–76.
   Rozhdestvensky A.V., Buzin V.A., Lobanov V.A. Study of the formation conditions and calculations of maximum water levels on the Lena River near the city of Lensk. Russian Meteorology and Hydrology, 2003, no. 2, pp. 68–76. (In Russian; abstract in English).
6. Агафонова С.А. Исследования ледового режима рек Арктической зоны России в XX и XXI вв // Арктика и Антарктика. 2019. №1. С. 81–94. DOI: 10.7256/2453-8922.2019.1.29530.
   Agafonova S.A. Studies of the ice regime of rivers in the Russian Arctic zone in the 20th and 21st centuries. Arctic and Antarctic, 2019, no. 1, pp. 81–94. DOI: 10.7256/2453-8922.2019.1.29530. (In Russian; abstract in English).
7. Сикан А.В. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации: учебник. СПб.: РГГМУ, 2007. 279 с.
8. Чалов Р.С. и др. Морфология, деформации, временные изменения русла р. Лены и их влияние на хозяйственную инфраструктуру в районе г. Якутска // Геоморфология. 2016. № 3. С. 22–35. DOI: 10.15356/0435-4281-2016-3-22-35.
   Chalov R.S. et al. Morphology, deformations, temporal changes of the Lena River channel and their impact on the economic infrastructure in the Yakutsk area. Geomorfologiya, 2016, no. 3, pp. 22–35. DOI: 10.15356/0435-4281-2016-3-22-35. (In Russian).
9. Курдюков С.Ю. Логистические возможности доставки грузов в Республику Саха (Якутия) // Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. 2023. № 3. С. 78–89. DOI: 10.51955/2312-1327_2023_3_78.

Kurdyukov S. Yu. Logistic possibilities of cargo delivery to the Republic of Sakha (Yakutia). Crede Experto: Transport, Society, Education, Language, 2023, no. 3, pp. 78–89. DOI: 10.51955/2312-1327_2023_3_78. (In Russian; abstract in English).

10. Дрегваль М.С., Гайдукова Е.В. Прогноз сроков ледовых явлений для определения навигационного периода на р. Лена // Образцовый маршрут. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. М.: МАДИ, 2024. С. 70–75.

Поступила в редакцию / Received 23.10.2025
Принята к публикации / Accepted 04.12.2025

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Дрегваль Мария Станиславовна, старший преподаватель, кафедра инженерной гидрологии, Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург, Россия, SPIN-код: 1232-1442, e-mail: msdregval@mail.ru.

Гайдукова Екатерина Владимировна, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой, кафедра инженерной гидрологии, Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург, Россия, SPIN-код: 9826-7365, e-mail:oderiut@mail.ru.

Батмазова Анна Александровна, ассистент кафедры, кафедра инженерной гидрологии, Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург, Россия, SPIN-код: 9810-7934, e-mail: batmazovaa@mail.ru.

Винокуров Игорь Олегович, старший преподаватель, кафедра инженерной гидрологии, Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург, Россия, SPIN-код: 3510-7566, e-mail: igor.o.vinokurov@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Maria S. Dregval, Senior Lecturer, Department of Engineering Hydrology, Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia, SPIN code: 1232-1442, e-mail: msdregval@mail.ru.

Ekaterina V. Gaidukova, Ph.D. (Technical Sciences), Associate Professor, Head of the Department of Engineering Hydrology, Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia, SPIN-code: 9826-7365, e-mail: oderiut@mail.ru.

Anna A. Batmazova, Assistant, Department of Engineering Hydrology, Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia, SPIN code: 9810-7934, e-mail: batmazovaa@mail.ru.

Igor O. Vinokurov, Senior Lecturer, Department of Engineering Hydrology, Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia, SPIN code: 3510-7566, e-mail: igor.o.vinokurov@gmail.com.

МЕТОДЫ, МОДЕЛИ И ТЕХНОЛОГИИ
METHODS, MODELS AND TECHNOLOGIES

Научная статья / Scientific paper
УДК: 627.222.5:528.8.04
DOI: 10.34753/HS.2025.7.4.367

Методы моделирования и прогнозирования процесса переработки берегов существующих водохранилищ

М.В. Степанова, В.Н. Экзарьян
Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ), г. Москва, Россия
e-mail: Stepanova-mariya2702@yandex.ru

Аннотация. В статье рассмотрены основные методы моделирования и прогнозирования процесса переработки берегов водохранилищ, выделены их положительные и отрицательные стороны. Актуальность выбранной тематики заключается в том, что в период с 1990-х годов по настоящее время на многих водохранилищах ведутся бессистемные мониторинговые наблюдения за процессом переработки берегов водохранилищ, что в конечном итоге может привести к критическим последствиям: разрушению прибрежной инфраструктуры, нарушению целостности геологической среды, увеличению площадей «потерянных» земель вблизи береговой зоны водохранилищ. С момента создания водохранилища и по сей день площади «потерянных» земель только увеличиваются и составляют десятки тысяч гектаров. Анализ публикаций за последние 30 лет, содержащих результаты изучения переработки берегов равнинных водохранилищ, указывает на отсутствие каких-либо серьезных разработок в части создание и внедрения методов прогнозирования изучаемого процесса. В работе были рассмотрены основные методы моделирования и прогнозирования: механико-детерминистический метод, метод натурных моделей и метод стохастических моделей. При моделировании необходимо определение точности применяемых методов и достоверности выполненных прогнозов. Проведение верификации моделей и оценка точности прогноза является ключевой и неотъемлемой частью прогнозирования и моделирования любого экзогенного геологического процесса. Предложен новый подход к моделированию и прогнозированию процесса, базирующийся на детальном изучении указанных методов, использовании материалов дистанционного зондирования Земли и методов математической статистики.

Ключевые слова: переработка берегов водохранилищ; классификация методов моделирования и прогнозирования; дистанционное зондирование; верификация данных.

Для цитирования: Степанова М.В., Экзарьян В.Н. Методы моделирования и прогнозирования процесса переработки берегов существующих водохранилищ // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2025. Т. 7. Вып. 4. С. 367–379. DOI: 10.34753/HS.2025.7.4.367.

Methods for Modeling and Forecasting Shoreline Erosion in Existing Reservoirs

Maria V. Stepanova, Vladimir N. Ekzaryan
Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia
e-mail: Stepanova-mariya2702@yandex.ru

Abstract. This article examines the principal methods for modeling and forecasting shoreline erosion processes in reservoirs and highlights their advantages and limitations. The relevance of this research stems from the fact that since the 1990s, monitoring of shoreline erosion at many reservoirs has been conducted in an unsystematic manner, which may ultimately lead to critical consequences: destruction of coastal infrastructure, disruption of the geological environment's integrity, and an increase in the area of "lost" lands adjacent to reservoir shorelines. Since the establishment of these reservoirs, the extent of such lost lands has continued to grow, now amounting to tens of thousands of hectares. An analysis of publications over the last 30 years regarding the shoreline evolution of plain reservoirs indicates a lack of significant developments in the creation and implementation of methods for predicting

the studied process. This paper evaluates the principal modeling and forecasting methodologies: mechanistic-deterministic, physical scale modeling, and stochastic modeling. When applying these models, it is essential to determine their accuracy and the reliability of the resulting forecasts. Model verification and assessment of forecast precision are crucial and integral components of predicting and simulating any exogenic geological process. A new approach to modeling and forecasting the process is proposed, based on a detailed study of these methods, using materials from remote sensing of the Earth and methods of mathematical statistics.

Keywords: reservoir shoreline erosion; classification of modeling and forecasting methods; remote sensing; data verification.

For citation: Stepanova M. V., Ekzaryan V. N. Methods for Modeling and Forecasting Shoreline Erosion in Existing Reservoirs. Hydrosphere. Hazard processes and phenomena, 2025, vol. 7, iss. 4, pp. 367–379. DOI: 10.34753/HS. 2025.7.4.367. (In Russian; abstract in English).

Введение

Строительство масштабных гидротехнических сооружений, в частности создание больших и малых водохранилищ, в середине XX века привело к значительному увеличению площади «потерянных» земель. Перед специалистами того времени возникла проблема проведения и организации режимных наблюдений за развитием экзогенных геологических процессов в пределах прибрежной зоны водохранилищ. Особое внимание уделялось процессу переработки берегов водохранилищ.

Процесс переработки берегов водохранилищ приводит к потере огромных площадей земель, угрозе для прибрежных сооружений и коммуникаций, а также загрязнению водоемов.

С начала 1990-х гг. по настоящее время постоянные режимные (мониторинговые) наблюдения за процессом переработки берегов водохранилищ Волжского каскада практически не ведутся, что приводит к колоссальным негативным последствиям как для жизнедеятельности человека, так и для окружающей природной среды в целом.

Цель работы заключается в рассмотрении существующих методов моделирования и прогнозирования процесса переработки берегов водохранилищ и обосновании наиболее подходящего из них с учетом использования современных способов получения и обработки информации о наличии и интенсивности процесса разрушения прибрежной территории.

Материалы и методы

Термин «переработка берегов водохранилищ» был введен академиком Ф.П. Саваренским в 1935 г. [1]. Под термином предложено понимать процесс разрушения и видоизменения береговой зоны искусственных водоемов (водохранилищ) под действием комплекса геологических процессов, гидродинамических факторов и климатических условий. Как показали многолетние режимные наблюдения наиболее интенсивно процесс переработки берегов протекает в первые годы после наполнения чаши водохранилища.

Площади «потерянных» земель за счет активизации процесса переработки берегов водохранилищ за период 1975–2005 гг. по водохранилищам Волжского каскада, Москворецкой системы и канала имени Москвы приведены в таблице 1. Из таблицы видно, что более трети общих потерь приходятся на территории сельскохозяйственного использования [2].

Благодаря этим данным, можно сказать о том, что процесс переработки берегов активно протекает, несмотря на предположения отдельных исследователей о затухании процесса во времени. Десятки тысяч гектар земель были «потеряны» в результате активности данного процесса.

К основным характеристикам процесса переработки берегов водохранилищ принято относить величину линейного отступания бровки берегового склона (м) и (или) объем размытых пород ($м^3$).

К факторам-условиям данного процесса относятся геолого-литологическое строение берегов, геодинамические условия, морфология прибрежной части берегового склона (высота берегового склона (клифа), ширина надводной и подводной части отмели, крутизна отмели и др.).

Таблица 1. Площадь «потерянных» земель за период 1975–2005 гг. по водохранилищам Волжского каскада, Москворецкой системы и канала имени Москвы
Table 1. The area of "lost" lands for the period 1975–2005 in the reservoirs of the Volga Cascade, the Moskvoretsky system and the Moscow Canal

Виды использования прибрежных территорий	Протяженность береговой линии, подверженной переработке, п. км	Площадь «потерянных» земель, га
Населенные пункты	417,2	1867,1
Сельскохозяйственные угодья	1218,8	4230,9
Лес	1547,7	6196,2
Всего	3183,7	12294,2

Факторы-процессы: волновой режим, колебание уровня воды в водохранилище, течения; климатические (ветровой режим, режим атмосферных осадков, ледовый режим); прочие, такие как судовое волнение, хозяйственная деятельность человека, растительность и др. Факторы-процессы взаимодействуют друг с другом и по-разному влияют на интенсивность переработки берегов водохранилища [3].

Процесс переработки берегов водохранилищ протекает в две стадии: неустановившегося и квазиустановившегося режима, что видно из графика изменения величины переработки берегов Волгоградского водохранилища, построенного по данным режимных наблюдений за процессом с 1960 по 2000 гг. (рисунок 1). На первой стадии размыв осуществляется в основном за счет ударно-механического, динамического воздействия волн и значительного колебания уровня водохранилища. На второй стадии берегообрушение происходит за счет воздействия комплекса факторов и в значительной степени определяется геологическим строением берегового склона и сформированной надводной и подводной части отмели. При этом энергия волн и изменения уровенного режима водохранилища является основными факторами-процессами, определяющими интенсивность переработки берегов [3].

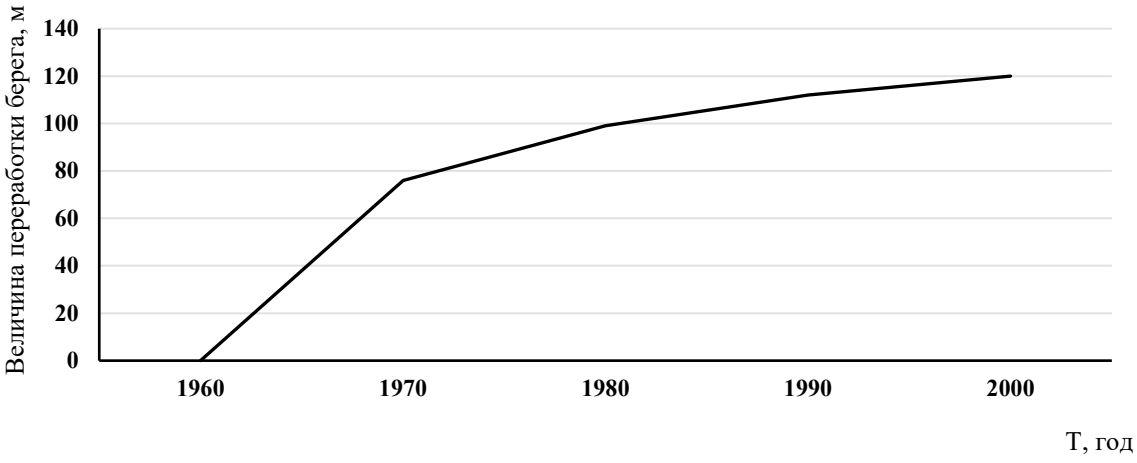


Рисунок 1. Обобщенный график изменения величины переработки берегов Волгоградского водохранилища
Figure 1. Generalized graph of changes in the amount of processing of the shores of the Volgograd reservoir

В процессе выполнения работы были собраны и проанализированы научные разработки исследователей по созданию и использованию методов прогнозирования процесса переработки берегов водохранилищ, а также производственные отчеты различных

организаций, содержащие результаты моделирования и прогноза при использовании этих методов. Изучаемый процесс относится к основным базовым процессам функционирования и эволюции водохранилищ. Процесс переработки водохранилищ наглядно представлен на рисунке 2. В летний период с 2024 по 2025 гг. авторами были проведены натурные наблюдения в пределах береговой зоны Волгоградского водохранилища с одноразовыми промерами в местах ранее заложенных режимных створов для определения берегов, подверженных процессу.



Рисунок 2. Процесс переработки берегов Волгоградского водохранилища (г. Камышин)
Figure 2. The process of processing the banks of the Volgograd reservoir (Kamyshin city)

Основные методы и модификации методов прогноза были разработаны в 1950-х гг. Н.Е. Кондратьевым, Б.А. Пышкиным, Е.Г. Качугиным, Л.Б. Розовским, Г.С. Золотаревым и др. Все методы фактически были разработаны для проектируемых водохранилищ и основаны на принципе, который можно назвать механико-детерминистическим [4].

Процесс переработки берегов водохранилищ существенно полифакторный и является неоднородным в пространстве и нестационарным во времени, а также характеризуется кумулятивным эффектом запаздывания по отношению к воздействию факторов на окружающую природную среду, что особенно ощутимо внутри годового цикла.

В середине 1970-х гг. был разработан новый метод прогноза процесса переработки берегов водохранилищ – метод стохастических моделей. Данный метод позволил повысить точность прогнозов для существующих водохранилищ за счет полного использования эмпирических результатов режимных (мониторинговых) наблюдений за процессом переработки берегов и факторами, его обуславливающими. Использование методов математической статистики и, в частности, многомерного

регрессионного анализа, открывало возможность более полного учета факторов процесса на основе его детальных геологической и физической моделей. Метод стохастических моделей универсален как для равнинных, так и горных водохранилищ, а также для водохранилищ в любых регионально-геологических, зонально-климатических и техногенных условиях [4].

Результаты

Анализ научной литературы за последние десятилетия показал, что мониторинговые наблюдения за процессом переработки берегов равнинных водохранилищ ведутся бессистемно. Многие ученые указывают на необходимость изучения процесса и разработку новых методов прогноза для условий квазиустановившегося режима с учетом современных методов получения и обработки мониторинговой информации [5–7]. Однако большинство научных статей посвящено определению основных причин переработки берегов, проведению мониторинговых наблюдений как натурным методом, так и при помощи использования материалов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [8–10], прогнозам процесса по «классическим» методам Г.С. Золотарева, Л.Б. Розовского, Е.Г. Качугина и др. [11, 12]. Большой вклад в современное изучение процесса переработки берегов водохранилищ внес В.Е. Левкевич [13, 14], в работах которого рассмотрены оценка влияния процесса на прилегающие территории, изучение динамики процесса с применением беспилотных летательных аппаратов, а также результаты инженерно-геологического районирования берегов водохранилищ и др. Проведенный анализ указывает, что за прошедшие десятилетия не было разработано новых методов прогнозирования процесса переработки берегов водохранилищ. В настоящее время наличие новых технологий получения и обработки информации требует совершенствования методологии изучения и прогнозирования процесса берегообрушения на существующих водохранилищах. Однако для определения репрезентативных факторов и условий протекания процесса переработки берегов необходимо детальное изучение результатов всех ранее выполненных исследований и в первую очередь «классических» методы прогноза, прошедших многолетнюю апробацию.

В работе рассмотрены методы прогноза переработки берегов водохранилищ, такие как: группа механико-детерминистических методов Н.Е. Кондратьева [15], Е.Г. Качугина [16], Г.С. Золотарева [17], метод натурных моделей Л.Б. Розовского [18-20], метод стохастических моделей В.К. Епишина – В.Н. Экзарьяна [21].

Механико-детерминистический метод.

Суть механико-детерминистического метода состоит в следующем: в геолого-гидрологической постановке задачи (абразионный процесс) учитываются волноэнергетическое воздействие на подводный и надводный склоны берега с фиксированными геоморфологическими и геолого-литологическими характеристиками; в математической модели используются только детерминированные методы. Наиболее глубокую теорию и полный алгоритм метода прогноза, основанного на механико-детерминистических принципах, раньше других, в 1953 г., предложил Н.Е. Кондратьев [15]. Другие методы, основанные на этом принципе, иногда разрабатывавшиеся независимо от метода Н.В. Кондратьева и опиравшиеся на работы В.А. Ширямова [22] и Б.В. Полякова [23], иногда даже расширявшие учет некоторых факторов переработки (за счет сужения учета других), являются с современной точки зрения частными случаями «принципа Кондратьева».

Эти методы можно подразделять на две подгруппы [24, 25]: методы, основанные на определении расчетной энергии ветрового волнения, и методы, основанные на учете морфометрии прибрежных отмелей. По существу, это единая группа методов, поскольку в методах первой подгруппы всегда учитываются углы прибрежных отмелей в явном виде, а в методах второй подгруппы всегда учитывается, но в неявном виде, энергия ветрового волнения и высота волн различной обеспеченности.

Методологические недостатки этой единой группы механико-детерминистических методов,

основанных «на принципе Кондратьева», следующие:

- существенная неполнота учитываемых факторов процесса (механических сил волнового (абразионного) и неволнового разрушения пород, слагающих береговой склон и сопротивления пород этому разрушению);
- детерминистическая природа используемых в методе математических моделей.

Первый недостаток отмечали многие исследователи, использующие эти методы при прогнозировании процесса переработки берегов. Причина существования этого недостатка объясняется малой натурной изученностью факторов и процесса переработки берегов водохранилищ (отсутствием представительных выборок рядов длительных наблюдений) и потому недостаточным в тот период времени знанием механизма процесса.

Второй недостаток заключается в том, что если рассмотреть общий вид прогнозной математической модели процесса переработки берегов, то можно заметить, что функции в правой части уравнения, описывающие уровенный и волноэнергетический режим водохранилища (факторы-процессы), являются стохастическими. А стохастический процесс адекватно может быть описан только с применением вероятностного математического аппарата, что невозможно в методах рассматриваемой группы.

Метод для расчёта переработки берегов водохранилищ Е.Г. Качугина был разработан в 1959 году [4]. Он заключается в определении скорости и величины отступания берегового уступа на заданный срок. Метод предполагает, что объёмы переработки берега пропорциональны суммарной энергии волн, воздействующих на него. Е.Г. Качугин отмечает, что в переработке берега водохранилища участвуют волны всех высот, а общий объём размытых пород пропорционален суммарной энергии волн в конкретном месте. Интенсивность процесса переработки зависит от сопротивления пород размыву и высоты берега. Процесс переработки берега затухает во времени, его изменение характеризуется кривой параболического вида.

Метод Е.Г. Качугина [16] имеет следующие ограничения:

- практически неприменим при прогнозе абразионного развития берегов, сложенных дисперсными породами;
- для высоких склонов со сложным геолого-литологическим строением, в котором участвуют скальные и полускальные грунты, расчёты по этому методу менее надёжны, так как коэффициенты размываемости упрощённо учитывают процессы разуплотнения и выветривания массивов пород;
- существенно редуцированный набор причин и условий процесса, учитываемых при расчете.

Разработанный Г.С. Золотаревым в 1969 г. графоаналитический метод дает возможность выполнить прогноз переработки берега на десятилетний период и на момент его полной стабилизации [17]. В основе метода лежит комплексный анализ геоморфологических, геологических и гидрогеологических условий.

Метод дает возможность рассчитать ширину зоны переработки берега и построить его новый профиль для конечной стадии периода эксплуатации водохранилища. Метод основан на построении профилей прогноза с использованием величин углов наклона отмели, пляжа и устойчивого подводного откоса, изменяющихся в зависимости от состава, состояния и свойств горных пород, слагающих берега водохранилищ. Исследователем предложена таблица с расчетными значениями углов абразионной прибрежной отмели, зон наката волн и коэффициентов аккумуляции, рекомендуемых для построения профилей прогноза переработки береговых склонов водохранилищ.

Построение профиля прибрежной отмели методом Г.С. Золотарева [17] выполняется применительно к уровню водохранилища, отвечающему заранее заданной повторяемости его положения. Для определения ширины подводной отмели производится ряд построений.

Для построения прогнозного профиля требуется следующий набор исходной информации: гидродинамические параметры акватории (высота и длина волн в зависимости от интенсивности и повторяемости ветра, с учетом

батиметрии и рельефа побережья); режим колебаний уровня воды в водохранилище для маловодных и многоводных периодов; инженерно-геологические модели береговых массивов в крупных масштабах (1:1000 – 1:200), включающие описание микрорельефа, литологии и свойств слагающих пород; сведения о гидрогеологическом режиме (количество, уровень и динамика водоносных горизонтов, а также степень их воздействия на устойчивость берегов); морфометрические характеристики устойчивости склонов, типичные для различных геолого-генетических типов горных пород.

Начальным этапом моделирования является определение местоположения бровки уступа подводной части отмели. Эта точка находится ниже отметки нормального подпорного горизонта (НПГ) на глубине, соответствующей величине максимального размыва.

Основными недостатками данного метода являются: схематизм – углы наклона отмели и коэффициента аккумуляции определяются в зависимости только от литологического состава пород; недостаточный учет факторов-процессов (волновой режим, уровенный режим, течения и другие).

Метод натурных моделей.

В основе метода лежит критериальный перенос эмпирических результатов исследований процесса переработки берегов водохранилищ с «натурной модели», охарактеризованной данными режимных (мониторинговых) наблюдений, на «натурный объект», требующий прогноза. Отсюда ясно, что метод Л.Б. Розовского [18–20] позволяет автоматически учитывать все особенности физической природы процесса переработки берегов водохранилищ, в том числе и его стохастичность. Другим важным преимуществом является универсальность метода в отношении прогнозов процесса переработки берегов: он с равным успехом применим для проектируемых и эксплуатируемых водохранилищ. В последнем случае помимо основной может быть предложена еще одна модификация метода – экстраполяция во времени параметров (характеристик) процесса переработки берегов по одному и тому же участку (створу). Понятно, что условия (критерии подобия) и пределы экстраполяции должны быть теоретически строго обусловлены, но в этой модификации метод фактически пересекается с методом кинематических стохастических моделей.

Единственным ограничением, накладываемым на метод Л.Б. Розовского [18], является малочисленность набора натурных моделей.

Метод стохастических моделей.

Метод стохастических моделей В.К. Епишина – В.Н. Экзарьяна [4] представляет собой подход к анализу и прогнозированию сложных систем, основанный на построении иерархии стохастических (вероятностных) моделей. Ключевая идея заключается в том, чтобы не пытаться создать одну сверхсложную модель, а разбить систему на уровни, где каждый следующий уровень уточняет и детализирует предыдущий, используя методы математической статистики и теории вероятностей.

Метод стохастических моделей разработан в двух модификациях: кинематической и динамической. Принципиальные преимущества данного метода следующие:

- стохастическая природа моделей в явном виде;
- эмпирическая природа стохастических моделей (отсутствие необходимости в априорных допущениях – в отличие от метода Н.В. Кондратьева);
- аналитическая природа стохастических моделей;
- существенная многомерность стохастических моделей;
- универсальность моделей в отношении всего разнообразия регионально-геологических, зонально-климатических и техногенных условий водохранилищ.

Основы метода базируются на принципах многоуровневости системы и ее иерархичности. В отличие от детерминированных моделей, метод признаёт и количественно оценивает влияние случайных факторов. На всех уровнях используются вероятностные распределения, случайные процессы и статистические оценки. Модели могут корректироваться по мере

поступления новых данных, что делает метод пригодным для прогнозирования в условиях изменяющейся среды.

В то же время теоретическая проработка геологической и физической моделей процесса переработки берегов водохранилищ, положенных в основание метода стохастических моделей, учитывает результаты натурных и лабораторных экспериментов и теоретических исследований при создании, внедрении и проверке других методов прогноза, в том числе новые результаты, а также возможность более детальной, чем в прежних методах, проработки геологической и физической моделей процесса переработки берегов водохранилищ и реализация ее в математической модели и численных методов прогноза.

Для выполнения процедуры прогноза необходимо: во-первых, определить цель, срок (период) и точность прогноза процесса переработки берегов водохранилищ; во-вторых, определить объект исследования (размер участка, количество створов), выбрать метод прогноза и определить конкретный алгоритм прогноза; в-третьих, проанализировать материал по величине переработки берега (ВПБ), построить кинематические модели процесса, определить информативность факторов переработки берегов, произвести специальное инженерно-геологическое районирование прибрежной территории. Выбор метода прогноза является важнейшей задачей. Далее по выбранным моделям выполняется непосредственно прогноз процесса на заданный срок.

Исходя из вышесказанного, для моделирования и прогноза процесса переработки берегов водохранилищ на срок 10 и более лет лучше использовать метод стохастических моделей В.К. Епишина – В.Н. Экзарьяна [4, 21]. Данный метод дает хорошее приближение к натуре, так как базируется на реальном проявлении процесса переработки берегов на каждом конкретном участке водохранилища с учетом полифакторности и вероятностной природы процесса.

В настоящее время мониторинговые наблюдения за процессом переработки берегов водохранилищ можно усовершенствовать с помощью данных ДЗЗ. Дешифрирование аэрофотоснимков и космических снимков позволяет определить величину переработки берега (ВПБ) по множеству визуально заложенных наблюдательных створов за заданный срок существования водохранилища, однако этот метод эффективен только при условии перехода процесса в квазистационарный режим.

При дешифрировании материалов ДЗЗ выделяются участки прибрежной территории водохранилища, подверженные процессу переработки берегов и участки, на которых процесс не проявляется. В пределах подверженных процессу участков определяется ВПБ по заданному сроку. Для этого закладываются множество «наблюдательных створов» в пределах прибрежной территории водохранилища. По результатам дешифрирования материалов дистанционных методов составляется выборка, включающая значения ВПБ по «наблюдательным створам» на заданный период времени, показатели факторов-условий на начальный год моделирования и факторов-процессов на выбранный период прогноза. Общая выборка подразделяется на основную выборку, по материалам которой строится прогнозная модель, и контрольную, по которой проводится верификация (оценка точности) прогноза.

По данным основной выборки «методом стохастических моделей» проводится построение прогнозной модели процесса переработки берегов конкретного водохранилища или участка береговой полосы и составляется прогноз на заданный срок.

Оценка точности прогнозных моделей проводится путем их верификации на основы данных контрольной выборки.

Обсуждение

В середине XX века при прогнозировании процесса переработки берегов водохранилищ использовались преимущественно детерминированные математические модели (работы Е.Г. Качугина, Н.Е. Кондратьева, Л.Б. Розовского). Однако, тот факт, что процесс является многофакторным (неоднородным в

пространстве и нестационарным во времени) дал возможность использования метода стохастических моделей.

Наиболее известные методы прогноза изучаемого процесса Г.С. Золотарева, Е.Г. Качугина, Н.Е. Кондратьева являются фактически методами прогноза процесса переработки берега проектируемых водохранилищ. В этих методах, обладающих более широкой областью применения (в принципе, они применимы и для прогнозов по существующим водохранилищам), процесс сильно схематизирован, что может приводить к большим ошибкам при прогнозировании процесса переработки берегов. Кроме этого, применение этих методов для прогнозов изучаемого процесса на существующих водохранилищах не позволяет в явном виде использовать имеющуюся мониторинговую информацию.

Как показала «ретроспективная проверка» прогнозов процесса переработки берегов водохранилищ, максимальные ошибки метода стохастических моделей, основанного на конкретной геологической (физической) модели и использовании существенной части накопленной информации, на порядок меньше.

Данный метод универсален и используется для составления прогнозов процесса для любых существующих водохранилищ (равнинных и горных) в любых регионально-геологических, зонально-климатических и техногенных ситуациях при условии построения моделей на эмпирическом режимном (мониторинговым) материале данного же водохранилища. Степень надежности полученных прогнозов определяется, прежде всего, длительностью стационарных наблюдений за характеристиками и факторами процесса конкретного водохранилища, а также полнотой и точностью этих наблюдений.

Использование материалов дистанционного ДЗЗ, аэрофотоснимков и космических снимков резко увеличивает информационное обеспечение моделирования и прогнозирования процесса переработки берегов и в комплексе с «методом стохастических моделей» позволяет повысить оперативность и точность выполнения прогнозов изучаемого процесса.

В основу разработки нового метода моделирования и прогнозирования процесса переработки берегов водохранилищ положены следующие положения:

- изучение рассмотренных «классических» методов позволяет определить наиболее репрезентативные факторы, определяющие наличие и активность процесса переработки водохранилища;
- использование материалов ДЗЗ дает возможность получить неограниченное количество данных, имеющих высокую разрешающую способность для определения количественных характеристик процесса и факторов его обуславливающих;
- применение современных методов обработки большого количества информации с помощью нейросетей и машинного обучения. Комбинируя различные архитектурные модели нейронных сетей, такие как LLM (большие языковые модели), RNN (рекуррентные нейронные сети), CNN (свёрточные нейронные сети) можно добиться достаточно быстрой и высокоточной обработки данных, в том числе фото-видео формата, с целью их систематизации и анализа;
- использование метода стохастических моделей, который показал минимальные ошибки при прогнозировании изучаемого процесса на водохранилищах Волжского каскада в качестве базового для построения моделей.

Основными особенностями рассматриваемого метода моделирования и прогнозирования переработки берегов водохранилищ являются:

1. не требует проведения натурных мониторинговых наблюдений;
2. обладает неограниченном увеличением объема информации о характеристиках процесса и факторах его обуславливающих;
3. повышается информативность и достоверность прогнозов.

Заключение

Анализ научной литературы показал, что за последние десятилетия исследователями не было

предложено нового метода моделирования и прогноза процесса переработки берегов водохранилищ. В основном работы ориентированы на проведение и получение результатов мониторинговых наблюдений с использованием беспилотных летательных аппаратов, определения основных причин проявления процесса и проведение прогноза общепринятыми «классическими» методами.

Для разработки нового метода был проведен анализ «классических» методов моделирования и прогнозирования процесса переработки берегов водохранилищ, что позволило определить наиболее универсальный из них – метод стохастических моделей. Именно благодаря этому методу можно с минимальными погрешностями дать прогноз и составить модель изучаемого процесса. Неотъемлемой частью прогноза является оценка точности прогноза, которую можно провести двумя способами: сверкой с фактическими данными на заданный прогнозный год, либо проведение верификации прогнозных математических моделей на основе контрольной выборки.

Результатом исследования станет разработка нового метода моделирования и прогнозирования процесса переработки берегов водохранилищ с использованием материалов ДЗЗ, а также использование нейросетей и методов математической статистики для обработки большого объема информации, что повысит точность, оперативность и надежность прогнозов.

Литература / References

1. Саваренский Ф.П. К вопросу о переработке береговых склонов реки при ее подпоре // Гидрогеология и инженерная геология. № 1. М.; Л.: ОНТИ, Гл. ред. геол.-развед. и геодез. лит., 1935. № 1. С. 5–14.
2. Экзарьян В.Н., Степанова М.В. Переформирование берегов водохранилищ как фактор социально-экологической опасности // Экологическая геология: теория, практика и региональные проблемы: Материалы восьмой научно-практической конференции, Воронеж, 10–13 сентября 2023 года. Воронеж: «Кварта», 2023. С. 113–115.
   Ekzaryan V.N., Stepanova M.V. Reshaping of reservoir shores as a factor of socio-ecological danger // Ecological geology: theory, practice and regional problems: Proceedings of the eighth Scientific and Practical Conference, Voronezh, September, 10–13, 2023. Voronezh: Kvarta Publ., 2023, pp. 113–115. (In Russian).
3. Степанова, М.В., Экзарьян В.Н. Закономерности развития процесса переработки берегов равнинных водохранилищ // Науки о Земле и недропользование. 2025. Т. 48, № 2(91). С. 249–259. DOI 10.21285/2686-9993-2025-48-2-249-259.
   Stepanova, M.V., Ekzaryan V.N. Patterns of development of the process of processing the shores of lowland reservoirs. Earth sciences and subsurface use, 2025, vol. 48, no. 2 (91), pp. 249–259. DOI 10.21285/2686-9993-2025-48-2-249-259. (In Russian).
4. Епишин В.К., Экзарьян В.Н. Прогноз процесса формирования берегов водохранилищ. М.: Энергия, 1979. 112 с.
5. Лагута А.А. О переработке берегов Краснодарского водохранилища // Региональные географические исследования: Сборник научных трудов / Под общей редакцией А.В. Погорелова. Том Выпуск 2 (12). Краснодар: Кубанский государственный университет, 2019. С. 23–30.
   Laguta A.A. On the redevelopment of the shores of the Krasnodar Reservoir. Regional Geographical Studies: Collection of Scientific Papers. Krasnodar: Kuban State University, 2019, iss. 2 (12), pp. 23–30. (In Russian).
6. Егоров И.Е. О некоторых современных тенденциях развития берегов правобережья Воткинского водохранилища // Тридцать шестое пленарное межвузовское координационное совещание по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов: Доклады и краткие сообщения, Ижевск, 11–15 октября 2021 года. Ижевск: Удмуртский государственный университет, 2021. С. 87–88.

Egorov I.E. On some contemporary trends in the development of the right bank of the Votkinsk Reservoir // Thirty-sixth plenary interuniversity coordination meeting on the problem of erosion, channel, and estuary processes: Reports and brief communications, Izhevsk, October 11–15, 2021. – Izhevsk: Udmurt State University, 2021. – pp. 87–88.

7. Скрипка Г.И., Ивлиева О.В., Беспалова Л.А. [и др.]. Современная динамика берегов Цимлянского водохранилища // Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа: Коллективная монография по материалам XI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Том XII. Москва: Институт истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова РАН, 2022. С. 540–546.
Skripka G.I., Ivlieva O.V., Bespalova L.A. [et al.]. Modern dynamics of the shores of the Tsimlyansk Reservoir // Modern problems of geology, geophysics, and geoecology of the North Caucasus: Collective monograph based on materials from the XI All-Russian Scientific and Technical Conference with international participation. Volume XII. – Moscow: S.I. Vavilov Institute for the History of Natural Sciences and Technology, Russian Academy of Sciences, 2022. – pp. 540-546.
8. Ткачев А.А., Цыганок О.Р., Хумарашвили Л.Э., Ключенко К.И. Исследование основных причин переработки берегов водохранилищ // Мелиорация как драйвер модернизации АПК в условиях изменения климата: Материалы V Международной научно-практической интернет-конференции, Новочеркасск, 22–24 апреля 2024 года. Новочеркасск: Лик, 2024. С. 168–177.
Tkachev A.A., Tsyganok O.R., Khumarashvili L.E., Klyuchenko K.I. Research into the main causes of reservoir bank erosion // Land reclamation as a driver of modernization of the agro-industrial complex in the context of climate change: Proceedings of the V International Scientific and Practical Internet Conference, Novocherkassk, April 22–24, 2024. – Novocherkassk: Lik, 2024. – pp. 168–177.
9. Смирнов А.И. Оценка переработки берегов Павловского водохранилища на реке Уфа с использованием гистехнологий // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов: Труды VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием: в 3 томах, Пермь, 30 мая 2019 года. Том I. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2019. С. 197–202.
Smirnov, A.I. Assessment of the processing of the banks of the Pavlovsk Reservoir on the Ufa River using histotechnologies // Contemporary problems of reservoirs and their catchment areas: Proceedings of the VII All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation: in 3 volumes, Perm, May 30, 2019. Volume I. – Perm: Perm State National Research University, 2019. – pp. 197-202.
10. Алейникова, М.В. Геоинформационное картографирование процессов переработки берегов Цимлянского водохранилища // Материалы Научной сессии: В 2 т. Направления: VIII. Экономика и финансы. IX. Управление и региональная экономика. X. Математика и информационные технологии. XI. Физические науки. XII. Естественные науки. XIII. Приоритетные технологии. XIV. Сервис и туризм. XV. Психология и педагогика, Волгоград, 22–26 апреля 2019 года. Том 2. Волгоград: Волгоградский государственный университет, 2019. С. 217–221.
Aleyikova, M.V. Geoinformation mapping of the processing of the banks of the Tsimlyansk Reservoir // Materials of the Scientific Session: In 2 volumes. Areas: VIII. Economics and Finance. IX. Management and Regional Economics. X. Mathematics and Information Technology. XI. Physical Sciences. XII. Natural Sciences. XIII. Priority Technologies. XIV. Services and Tourism. XV. Psychology and Pedagogy, Volgograd, April 22–26, 2019. Volume 2. – Volgograd: Volgograd State University, 2019. – pp. 217–221.
11. Володин Н.И. Прогноз переработки берегов водохранилищ математическими методами // Геология и охрана недр. 2025. № 2(95). С. 80–88.
Volodin N.I. Forecast of reservoir bank processing using mathematical methods. Geology and Subsurface Protection, 2025, no. 2 (95). pp. 80–88. (In Russian).12. Журавлева В.В. Алгоритм численных расчетов

для модели переформирования берега внутреннего водоема // Известия Алтайского государственного университета. 2020. № 1(111). С. 89–94. DOI: 10.14258/izvasu(2020)1-14.

12. Zhuravleva V.V. Numerical calculation algorithm for the model of reshaping the shore of an inland water body. News of Altai State University, 2020, no. 1(111). pp. 89–94. DOI: 10.14258/izvasu(2020)1-14. (In Russian, Abstract in English).
13. Левкевич В.Е. Оперативная оценка масштабов комплексноговлияния водохранилищ на прилегающие территории // ICEP - 2023 Актуальные научно-технические и экологические проблемы сохранения среды обитания: Сборник научных статей Международной научно-практической конференции, посвященной памяти доцента кафедры природообустройства, кандидата географических наук, доцента Шпока Ирины Николаевны, Брест, 16–17 октября 2023 года. Брест: Учреждение образования "Брестский государственный технический университет", 2023. С. 181–189.
    Levkevich V.E. Operational assessment of the scale of the complex impact of reservoirs on adjacent territories // ICEP - 2023 Current scientific, technical, and environmental problems of habitat conservation: Collection of scientific articles from the International Scientific and Practical Conference dedicated to the memory of Associate Professor of the Department of Environmental Management, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor Irina Nikolaevna Shpok, Brest, October 16–17, 2023. – Brest: Brest State Technical University, 2023. – pp. 181–189.
14. Левкевич В.Е. Динамика береговых процессов на водохранилищах гидроэектростанций Беларуси // Водные пути и русловые процессы. Гидротехнические сооружения водных путей: Сборник научных трудов IV международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 29 мая 2019 года. Том Выпуск 4. Санкт-Петербург: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова, 2019. С. 259–270.
    Levkevich V.E. Dynamics of coastal processes at reservoirs of hydroelectric power plants in Belarus // Waterways and channel processes. Hydraulic structures of waterways: Collection of scientific papers of the IV International Scientific and Practical Conference, St. Petersburg, May 29, 2019. Volume Issue 4. – St. Petersburg: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Admiral S.O. Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 2019. – pp. 259-270.
15. Кондратьев Н.Е. Расчеты ветрового волнения и переформирования берегов водохранилищ. Л., Гидрометеоздат, 1953. 110 с.
16. Качугин Е.Г. Рекомендации по изучению переработки берегов водохранилищ. Всесоюзный институт гидрогеологии и инженерной геологии (ВСЕГИНГЕО). М.: Госгеолтехиздат, 1959. 89 с.
17. Золотарев Г.С. Инженерно-геологическое изучение береговых склонов водохранилищ и оценка их переработки. // «Труды лаборатории гидрогеологических проблем». М., АН СССР, т. 7, 1955. С. 38–57.
18. Розовский Л.Б. Введение в теорию геологического подобия и моделирования. М., «Недра», 1969. 126 с.
19. Розовский Л.Б. О прогнозе переработки берегов водохранилищ по аналогии. «Труды 7-го Байкальского научного координационного совещания по изучению берегов водохранилищ». М., «Наука», 1961. С. 45–57.
20. Розовский Л.Б. Переработка берегов водохранилищ за 10 лет эксплуатации // Гидротехническое строительство. №2. 1954. С. 37–52.
21. Епишин В.К., Экзарьян В.Н. Опыт прогнозирования переработки берегов существующих водохранилищ методом стохастических моделей // Экспресс-информация ВИЭМС. 1974. Вып. 8, № 8. С. 71–72.

22. Ширямов В.А. К вопросу о переработке береговых склонов водохранилищ // Труды института геологических наук. Сер. Инженерная геология. 1940. Вып. 23, № 2. С. 41–54.

23. Поляков Б.В. Гидрогеологический режим водохранилищ. // Сборник Нижне-Волгпроекта. Вып. VIII. М.: ОНТИ, 1938. С. 16–21.

24. Пышкин Б.А. Вопросы динамики берегов водохранилищ. Киев: Изд-во АН УССР, 1963. 331 с.

25. Самохвалова М.П. К вопросу прогноза переработки берегов Сталинградского водохранилища на участках хвалынской террасы //Труды Лаборатории гидрогеологических проблем АН СССР. 1961. Т. 35. С. 123–132.

Поступила в редакцию / Received 24.11.2025
Принята к публикации / Accepted 05.12.2025

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Степанова Мария Владимировна, аспирант, Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ), г. Москва, Россия, https://orcid.org/0009-0009-4917-5649, SPIN: 5299-8443, e-mail: Stepanova-mariya2702@yandex.ru.

Экзарьян Владимир Нишанович, доктор геолого-минералогических наук, заведующий кафедрой, профессор, Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ), г. Москва, Россия, https://orcid.org/0000-0003-3961-8003, SPIN: 7968-3231, e-mail: vnekzar@rambler.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Maria V. Stepanova, postgraduate student, Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia, https://orcid.org/0009-0009-4917-5649, SPIN: 5299-8443, e-mail: Stepanova-mariya2702@yandex.ru.

Vladimir N. Ekzaryan, D.Sc. (Geology and Mineralogy), Head of the Department, Professor, Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia, https://orcid.org/0000-0003-3961-8003, SPIN: 7968-3231, e-mail: vnekzar@rambler.ru.

Научная статья / Scientific paper
УДК: 624.131.53
DOI: 10.34753/HS.2025.7.4.380

Оценка величины относительной тангенциальной деформации

А.Ю. Виноградов[1,2], В.А. Обязов[1], А.С. Войтенко[1], Г.П. Романов[1]
[1]ООО НПО «Гидротехпроект», г. Валдай, Россия; [2]Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, г. Санкт-Петербург, Россия
e-mail: gd@npogtp.ru

Аннотация. Вопрос устойчивости массивов грунта при внешних воздействиях, возникающих в том числе при строительстве зданий и сооружений, решается путем определения прочностных характеристик грунта. В инженерной практике это выражается в определении сопротивления грунта сдвигу при предельно напряженном состоянии. Понятие прочности грунта в первую очередь связано с обеспечением устойчивости грунтового основания фундамента. При потере устойчивости откосов оснований и их обрушении в грунтовом массиве происходит сдвиг одной части относительно другой, поэтому прочностные свойства грунта напрямую связаны с сопротивлением грунта сдвигу.

Согласно требованиям ГОСТ, испытание грунта производят при различных значениях постоянной нагрузки до тех пор, пока одна часть грунта не сдвинется относительно другой на расстояние более 10 % от диаметра испытуемого образца. При этом измеряют максимальное усилие, которое было достигнуто в ходе испытаний.

Однако, в связи с тем, что стандартные образцы испытуемые в лабораторных и полевых условиях имеют цилиндрическую форму, относительный десятипроцентный сдвиг, определенный как отношение величины сдвига к диаметру образца, не соответствует требуемой ГОСТ величине относительной деформации. Поскольку деформация при одноплоскостном сдвиге, как и при компрессионном воздействии, затрагивает весь объем образца, то правильной оценкой относительности деформации будет отношение величины сдвигаемой площади ко всей площади среза. В регламентирующих документах данный аспект не рассмотрен, стандартные формулы однозначного решения проблемы не дают. В предлагаемой работе предложены методы расчета сдвигаемой площади от линейного сдвига подвижной рамки приборов одноплоскостного сдвига. Проведена оценка погрешности расчетов величин относительного сдвига, вызванных при учете относительной тангенциальной деформации по линейному методу в сравнении с площадным.

Ключевые слова: прочностные свойства грунта; одноплоскостной срез; касательное напряжение; деформация грунта; угол внутреннего трения; удельное сцепление.

Для цитирования: Виноградов А.Ю., Обязов В.А., Войтенко А.С., Романов Г.П. Оценка величины относительной тангенциальной деформации // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2025. Т. 7. Вып. 4. С. 380–389. DOI: 10.34753/HS.2025.7.4.389.

Evaluation of the Relative Tangential Deformation Value

Alexey Yu. Vinogradov[1,2], Victor A. Obyazov[1], Andrey S. Voitenko[1], Georgiy P. Romanov[1]
[1]Scientific and Industrial Research Association Gidrotehproekt, Valday, Russia; [2]Saint Petersburg State Forest Technical University, St. Petersburg, Russia
e-mail: gd@npogtp.ru

Abstract. The issue of soil mass stability under external influences, including those arising during the construction of buildings and structures, is evaluated by determining the soil strength characteristics. In engineering practice, this involves determining the shear resistance of the soil at the ultimate stress state. The concept of soil strength is primarily related to ensuring the stability of the soil foundation. When the slopes of the foundations lose stability and collapse, the soil mass shifts one part relative to the other, and therefore the strength properties of the soil are directly related to its shear resistance.

According to GOST requirements, soil is tested under various constant load values until one part of the soil moves relative to the other by more than 10 % of the diameter of the test sample. At the same time, the maximum force that was achieved during the tests is measured.
However, due to the fact that the standard samples tested in laboratory and field conditions have a cylindrical shape, the relative ten percent shear, defined as the ratio of the shear value to the sample diameter, does not determine the required relative deformation value according to GOST. Since the deformation during single-plane shear, similar to compression, affects the entire volume of the sample, the correct assessment of the relative deformation would be the ratio of the shear area to the total cutting area. This aspect is not addressed in the regulatory documents, and the standard formulas do not provide a clear solution to the problem. In the proposed work, methods for calculating the shear area from the linear shear of the movable frame of single-plane shear devices are proposed. An error assessment was performed for the relative shear values caused by the relative tangential deformation using the linear method in comparison with the area method.
Keywords: soil strength properties; single-plane shear; tangential stress; soil deformation, internal friction angle, specific adhesion.
For citation: Vinogradov A. Yu., Obyazov V. A., Voitenko A. S., Romanov G. P. Evaluation of the Relative Tangential Deformation Value. Hydrosphere. Hazard processes and phenomena, 2025, vol. 7, iss. 4, pp. 380–389. DOI: 10.34753/HS.2025.7.4.380. (In Russian; abstract in English).

Введение

Разрушение грунта происходит при преодолении тангенциальным (сдвигающим) усилием предела прочности на сдвиг, в связи с этим, характеристиками грунта, определяющими его несущую способность, являются прочностные характеристики [1, 2, 3, 4]. К прочностным характеристикам грунта, согласно ГОСТ 12248.1-2020[1] (ГОСТ), относятся удельное сцепление c и угол внутреннего трения φ, определяемые методом одноплоскостного среза, при котором срез в приборах производится по фиксированной плоскости путем перемещения одной части срезной коробки цилиндрической формы относительно другой (п.3.2 ГОСТ). Данный метод позволяет оценить сопротивление смещению одной части грунта по отношению к другой, характеризуемое величиной сдвигающего давления, при которой происходит срез грунта (п.3.1 ГОСТ).

При испытаниях в статическом режиме (пп. 8.7; 8.10 ГОСТ) срезающая нагрузка передается ступенями по 5 % от значения нормальной с измерениями деформации среза. Испытание считается законченным, если при приложении очередной ступени касательной нагрузки происходит мгновенный срыв части образца или относительная деформация образца превысит 10%. Мы в дальнейших рассуждениях основываемся на безусловном соблюдении данного требования.

График зависимости $l = f(\tau)$, где l – деформация, определяемая в мм, строится согласно приложения Б ГОСТа. В тех случаях, когда срыв не происходит и значение касательного напряжения возрастает монотонно, а это в случае испытаний связных грунтов наблюдается довольно часто, критерий прекращения испытаний становится весьма важным при расчете прочностных характеристик грунта [5, 6].

Вопрос перехода от абсолютных значений тангенциальной деформации к относительным в ГОСТе отдельно не рассматривается, хотя он не определяется однозначно.

Если при оценке относительной нормальной деформации проблем в ее определении нет – она определяется отношением абсолютной вертикальной деформации к первоначальной высоте образца, то как быть с тангенциальной?

Поскольку при проведении испытаний по схеме одноплоскостного среза образцы имеют форму цилиндра (п. 5.6 ГОСТ), с геометрической точки зрения принимаемое отношение сдвига к

[1] ГОСТ 12248.1–2020. Грунты. Определение характеристик прочности методом одноплоскостного среза

диаметру образца (Примечание к п. 8.8 ГОСТ), как оценку относительной тангенциальной деформации, нельзя признать правильным решением этой задачи. Более корректным представляется использование площадных характеристик сдвига вместо линейных.

Целью настоящей статьи является попытка разработать расчетный метод определения относительной тангенциальной деформации, оценить погрешность принятого подхода к её определению и влияние этой погрешности на результаты расчетов оснований зданий и сооружений, производимых по методикам СП 22.13330.2016[2].

Материалы и методы

В работе использованы результаты четырех десятков лабораторных консолидированно-дренированных испытаний образцов на одноплоскостной срез для следующих инженерно-геологических элементов:

− ИГЭ-1 – среднечетвертичные ледниковые отложения (gIIms), состоящие из суглинка лёгкого песчанистого, местами тяжёлого пылеватого, полутвёрдого, серовато-коричневого, с отдельными линзами и прослойками супеси песчанистой, пластичной, с включениями до 15 % дресвы и щебня осадочных и магматических пород, среднедеформируемого, слабопучинистого;

− ИГЭ-2 – среднечетвертичные ледниковые отложения (gIIms), состоящие из глины лёгкой пылеватой, полутвердой консистенции, тёмно-коричневой, известковистой, с включениями до 5 % гравия, щебня и отдельных валунов, среднедеформируемой, слабопучинистой;

− ИГЭ-3 – верхнечетвертичные ледниковые отложения (gIIIv), состоящие из глины лёгкой пылеватой, полутвёрдой консистенции, тёмно-коричневой, известковистой, с включениями до 5 % дресвы и щебня, отдельных валунов, с отдельными линзами, прослойками и гнёздами песка мелкого, плотного, влажного;

− ИГЭ-4 – среднечетвертичные водно-ледниковые отложения (f,gIIIms), состоящие из супеси песчанистой, пластичной, коричневато-серой, с включениями до 10–15 % гравия, дресвы и щебня;

− ИГЭ-5 – верхнечетвертичные ледниковые отложения (gIIIv), состоящие из суглинка тяжёлого пылеватого, полутвёрдой консистенции, красновато-коричневого, с тонкими прослойками и линзами песка мелкого, плотного, влажного, с включениями до 10 % гравия, гальки и щебня, редко валунов, среднедеформируемого, слабопучинистого.

Для каждого инженерно-геологического элемента используемые характеристики были осреднены.

Угол внутреннего трения φ и удельное сцепление c вычислялись по формулам, указанным в ГОСТ.

Расчетное сопротивление грунта основания R, которое определяется в зависимости от угла внутреннего трения и удельного сцепления грунта вычислялось по формуле (п. 5.6.7 СП 22.13330.2016):

$$R = \frac{\gamma_{c1} \cdot \gamma_{c2}}{k}(M_\gamma k_z b \gamma_{II} + M_q d_I \gamma_{II}^l + (M_q - 1) d_b \gamma_{II}^l + M_c c_{II}) \quad (1)$$

где γ_{c1}, γ_{c2} – коэффициенты условий работы, принимаемые по таблице 5.4; k – коэффициент, принимаемый равным единице, если прочностные характеристики грунта (φ и c_{II}) определены непосредственными испытаниями; M_γ, M_q, M_c – коэффициенты, принимаемые по таблице 5.5 в зависимости от значения угла внутреннего трения; k_z – коэффициент, принимаемый равным единице при b < 10 м; b – ширина подошвы фундамента, м; γ_{II} – осредненное (см. п. 5.6.10 СП 22.13330.2016) расчетное значение удельного веса грунтов, залегающих ниже подошвы фундамента (при наличии подземных вод определяется с учетом взвешивающего действия воды), кН/м^3; γ_{II}^l – то же, для грунтов, залегающих выше подошвы фундамента, кН/м^3; c_{II} – расчетное значение

[2] СП 22.13330.2016 Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83* (с Изменениями N 1, 2, 3)

удельного сцепления грунта, залегающего непосредственно под подошвой фундамента; d_I – глубина заложения фундаментов, м, d_b – глубина подвала, м.

Вертикальную составляющую силы предельного сопротивления N_u, кН, основания (п. 5.7.11 СП 22.13330.2016), сложенного дисперсными грунтами в стабилизированном состоянии, допускается вычислять по формуле, которая впрямую зависит от угла внутреннего трения и удельного сцепления грунта:

$$N_u = b \cdot l(N_\gamma \xi_\gamma b \gamma_I + N_q \xi_q d \gamma_I^l + N_c \xi_c c_I) \quad (2)$$

где b, l – соответственно приведенные ширина и длина фундамента, м; γ_I, γ_I^l – расчетные значения удельного веса грунтов, кН/м^3, находящихся в пределах возможной призмы выпирания соответственно ниже и выше подошвы фундамента (при наличии подземных вод определяют с учетом взвешивающего действия воды для грунтов, находящихся выше водоупора); c_I – расчетное значение удельного сцепления грунта, кПа; d – глубина заложения фундамента, м; ξ_γ, ξ_γ, ξ_γ – коэффициенты формы фундамента; N_γ, N_q, N_c – безразмерные коэффициенты несущей способности, определяемые по таблице 5.12 в зависимости от расчетного значения угла внутреннего трения грунта φ и угла наклона к вертикали равнодействующей внешней нагрузки на основание F в уровне подошвы фундамента.

В расчете, угол наклона к вертикали равнодействующей внешней нагрузки на основание условно принят равным 0; $b = l$ =1; $\gamma_I = \gamma_I^l$ =20 кН.

Результаты и обсуждение

Определение относительной тангенциальной деформации с использованием площадных её характеристик $\Delta S/S$ сводится к расчету площади сдвига ΔS при известной площади образца S.

Первый способ расчета ΔS.

Рассмотрим смещение круга с центром в точке O_1 на расстояние Δl в точку O_2 (рисунок 1).

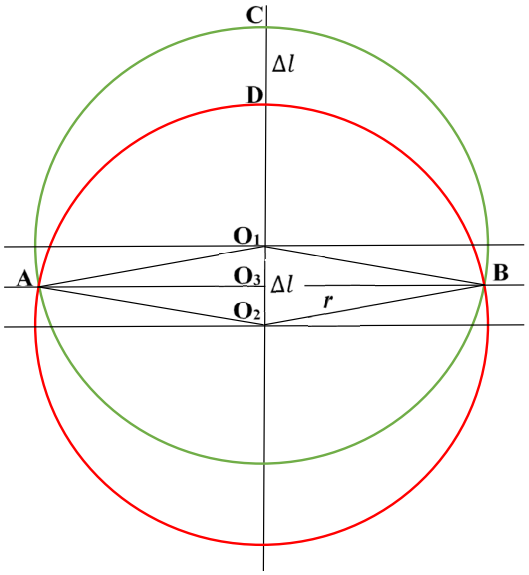


Рисунок 1. Схема, иллюстрирующая расчет ΔS первым способом

Figure 1. Diagram illustrating the calculation of ΔS using the first method

Дано:

$O_1O_2=\Delta l$,

$O_1A=O_2B=O_1B=O_2A = r$.

Задача:

найти площадь ΔS(ACBD)

Решение:

S(ACBD)=S(ACBO$_1$)−(S(ADBO$_2$)−S(AO$_1$BO$_2$))

AO$_1$BO$_2$ – ромб (поскольку все стороны равны). Площадь ромба можно вычислить 2 способами:

S(AO$_1$BO$_2$) = 1/2·O$_1$O$_2$·AB

S(AO$_1$BO$_2$) = AO$_1$·sinα

AB=2AO$_3$ (поскольку диагонали ромба точкой пересечения делятся пополам)

Из треугольника AO$_1$O$_3$ найдем, что

$$AO_3 = \sqrt{AO_1^2 - O_1O_3^2} = \sqrt{r^2 - \left(\frac{\Delta l}{2}\right)^2}$$

$$AB = 2AO_3 = 2\sqrt{r^2 - \left(\frac{\Delta l}{2}\right)^2} = \sqrt{4r^2 - \Delta l^2}$$

$$S(AO_1BO_2) = \frac{1}{2} h \sqrt{4r^2 - \Delta l^2}$$

С другой стороны

$$S(AO_1BO_2) = AO_1^2 \sin\alpha = r^2 \sin\alpha$$

Получаем, что

$$r^2 \sin\alpha = \frac{1}{2}\Delta l\sqrt{4r^2 - \Delta l^2}$$

$$\sin\alpha = \frac{h}{2r^2}\sqrt{4r^2 - \Delta l^2}$$

Итак, угол O_1AO_2=arcsin($\frac{\Delta l}{2r^2}\sqrt{4r^2 - \Delta l^2}$)

Тогда

$$\widehat{AO_1B} = \widehat{AO_2B} = \pi - \arcsin\left(\frac{\Delta l}{2r^2}\sqrt{4r^2 - \Delta l^2}\right)$$

Теперь легко вычислить площадь секторов:

$$S(ADBO_2) = \frac{\widehat{AO_2B}}{2}AO_2^2 = \\ = \frac{r^2}{2}\left(\pi - \arcsin\left(\frac{\Delta l}{2r^2}\sqrt{4r^2 - \Delta l^2}\right)\right)$$

$$S(\mathrm{ACBO_1}) = \frac{2\pi - \widehat{AO_1B}}{2}AO_1^2 \\ = \frac{r^2}{2}\left(2\pi - \pi + \arcsin\left(\frac{\Delta l}{2r^2}\sqrt{4r^2 - \Delta l^2}\right)\right) \\ = \frac{r^2}{2}\left(\pi + \arcsin\left(\frac{\Delta l}{2r^2}\sqrt{4r^2 - \Delta l^2}\right)\right)$$

Итоговое решение:

$$S(ACBD) = S(\mathrm{ACBO_1}) - \left(S(ADBO_2) - S(AO_1BO_2)\right) = \\ = \frac{r^2}{2}\left(\pi + \arcsin\left(\frac{\Delta l}{2r^2}\sqrt{4r^2 - \Delta l^2}\right)\right) \\ - \frac{r^2}{2}\left(\pi - \arcsin\left(\frac{\Delta l}{2r^2}\sqrt{4r^2 - \Delta l^2}\right)\right) \\ + \frac{1}{2}h\sqrt{4r^2 - \Delta l^2} = \\ = \frac{r^2}{2}\left(\pi + \arcsin\left(\frac{\Delta l}{2r^2}\sqrt{4r^2 - \Delta l^2}\right) - \right. \\ \left. + \arcsin\left(\frac{\Delta l}{2r^2}\sqrt{4r^2 - \Delta l^2}\right)\right) \\ + \frac{1}{2}\Delta l\sqrt{4r^2 - \Delta l^2} \\ = r^2 \arcsin\left(\frac{\Delta l}{2r^2}\sqrt{4r^2 - \Delta l^2}\right) \\ + \frac{1}{2}\Delta l\sqrt{4r^2 - \Delta l^2}$$

Надо иметь в виду, что данная зависимость верна только при $\Delta l \ll r$.

Второй способ расчета ΔS.

При некотором сдвиге Δl площадь неподвижной цилиндрической части сдвигового прибора можно представить, как сумму трех площадей (рисунок 2):

$$S = \Delta S + S_{\text{сег}} + S_{\text{сег}}$$

Отсюда

$$\Delta S = S - 2S_{\text{сег}}$$

$$S_{\text{сег}} = r^2 \cdot \arccos\left(\frac{r-h}{r}\right) - \frac{r^2}{2}\sin(2 \\ \cdot \arccos\left(\frac{r-h}{r}\right))$$

где: r – радиус круга; h – высота сегмента.

Высота сегмента $S_{\text{сег}}$ в данном случае вычисляется по формуле:

$$h = (D - \Delta l)/2$$

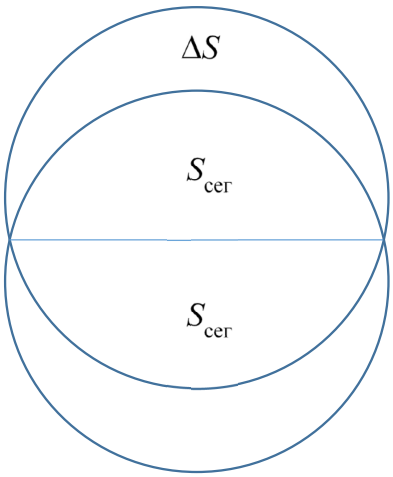


Рисунок 2. Схема, иллюстрирующая расчет ΔS вторым способом

Figure 2. Schematic diagram illustrating the calculation of ΔS using the second method

Относительная деформация под действием касательной силы, следовательно, равна отношению площади сдвига при измеренной длине сдвига Δl в результате касательного силового воздействия к общей площади, по которой происходит касательный сдвиг. Площадь сдвига на расстояние Δl круга радиусом r составит в первом варианте расчета:

$$\Delta S(1) = r^2 \arcsin\left(\frac{\Delta l}{2r^2}\sqrt{4r^2 - \Delta l^2}\right) \\ + \frac{1}{2}\Delta l\sqrt{4r^2 - \Delta l^2}; \quad (3)$$

во втором варианте:

$$\Delta S(2) = S - 2(r^2 \cdot \arccos\left(\frac{r-h}{r}\right) \\ - \frac{r^2}{2}\sin(2 \\ \cdot \arccos\left(\frac{r-h}{r}\right))). \quad (4)$$

Для расчетов принят диаметр образца 71,4 мм, соответствующий площади его поперечного сечения 40 см^2, используемый у наиболее распространенных приборов для испытания грунтов на сдвиг, например, ПСГ-3М.

Сравнение результатов расчетов относительной тангенциальной деформации по формулам (3) и (4) показали их полную идентичность и существенное их отличие от результатов, полученных линейным методом (таблица 1).

Таблица 1. Расчет относительной тангенциальной деформации линейным и площадным методами
Table 1. Calculation of relative tangential deformation using linear and area methods

l, мм	0,1	0,5	1	2	3	4	5	6	7	7,14
$\varepsilon_\tau = \Delta l/D$	0,0014	0,0070	0,0140	0,0280	0,0420	0,0561	0,0701	0,0841	0,0981	0,1
$\varepsilon_\tau(1) = \Delta S(1)/S$	0,0018	0,0089	0,0178	0,0357	0,0535	0,0714	0,0892	0,1070	0,1247	0,1272
$\varepsilon_\tau(2) = \Delta S(2)/S$	0,0018	0,0089	0,0178	0,0357	0,0535	0,0713	0,0891	0,1069	0,1247	0,1272

Относительная тангенциальная деформация достигает 10 %-ного значения, при котором испытание прекращается, в случае площадного метода её определения при величинах сдвига на 27 % меньше, чем в случае линейного метода (рисунок 3).

Как следствие этого появляется ошибка в определении значений угла внутреннего трения и сцепления. Их значения, полученные в результате лабораторных консолидированно-дренированных испытаний образцов на одноплоскостной срез, выполненных по ГОСТ, а также скорректированные с учетом предлагаемой поправки на расчет относительной деформации площадным методом для различных инженерно-геологических элементов (ИГЭ 1–5) представлены в таблице 2. Надо иметь в виду, что в связи с нелинейностью зависимости между касательным напряжением и относительной тангенциальной деформацией рассматриваемая ошибка возрастает в среднем еще на 5–10 %.

Таблица 2. Сравнительные значения угла внутреннего трения и сцепления, полученные при различных методах расчета относительной тангенциальной деформации
Table 2. Comparative values of the internal friction angle and adhesion obtained using different methods of calculating relative tangential deformation

ИГЭ		1	2	3	4	5
φ, град	$\varepsilon_\tau = \Delta l/D$	23,3	18,3	17,2	33,8	18,3
	$\varepsilon_\tau = \Delta S/S$	17,4	13,5	12,7	26,1	13,5
с, кПа	$\varepsilon_\tau = \Delta l/D$	47	92	85	125	68
	$\varepsilon_\tau = \Delta S/S$	34	67	62	91	50

Использование полученных значений угла внутреннего трения и сцепления с учетом площадной поправки для расчетов сопротивления грунта основания и вертикальной составляющей силы предельного сопротивления по формулам (1) и (2) показали существенные отличия от результатов, рассчитанных по ГОСТ (таблицы 3 и 4). Ранее уже отмечалось [7], что ошибка на 1 градус в величине угла внутреннего трения и 1 кПа в величине удельного сцепления приводит к ошибкам в определении расчетного сопротивления грунта основания и вертикальной составляющей силы предельного сопротивления до 10 % в зависимости от связности грунта.

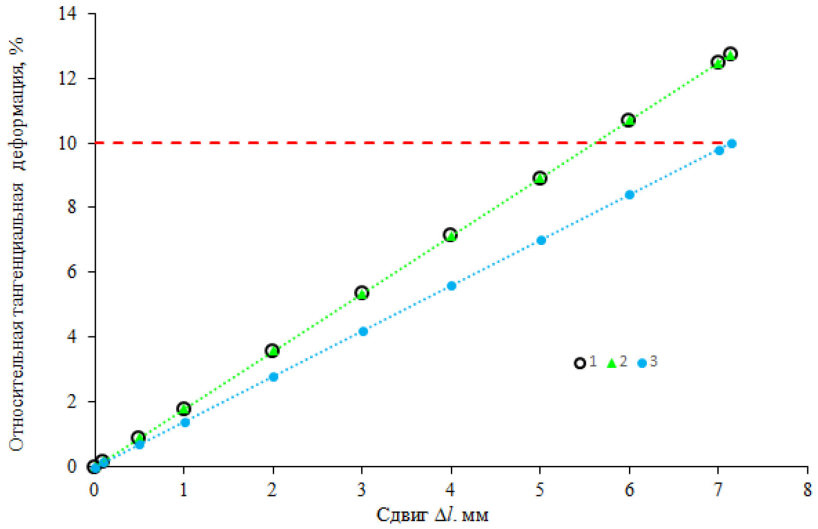


Рисунок 3. Графики зависимости относительной тангенциальной деформации, рассчитанной площадными (1 и 2) и линейным (3) методами, от величины сдвига
Figure 3. Graphs of the dependence of the relative tangential deformation calculated by the area (1 and 2) and linear (3) methods on the shear value

Определение расчетного сопротивления грунта основания проводилось с следующими условными принятыми параметрами: $\gamma_{c1} = 1{,}25$, $\gamma_{c2} = 1{,}1$; $k = 1{,}0$; $k_z = 1{,}0$; $b = 1{,}0$ м; $\gamma_{II} = 17{,}65$ кН/м^3; $\gamma_{II}^l = 16{,}67$ кН/м^3; $d_I = 2{,}5$, м, $d_b = 2{,}0$ м.

Принятые значения коэффициентов M_γ, M_q, M_c, в зависимости от величины угла внутреннего трения и результаты расчетов расчетного сопротивления грунта основания по формуле (1) представлены в таблице 3.

Таблица 3. Принятые значения коэффициентов M_γ, M_q, M_c в зависимости от величины φ, град (таблица 2) и результаты расчетов расчетного сопротивления грунта основания по формуле 1
Table 3. Accepted values of the coefficients M_γ, M_q, M_c, depending on the value of φ, degrees (table 2), and the results of calculating the calculated resistance of the foundation soil using formula 1

ИГЭ	ε_τ	M_γ	M_q	M_c	R, кПа	Погрешность
1	$\Delta l/D$	0,68	3,72	6,31	762,1	0,592
	$\Delta S/S$	0,4	2,63	5,21	478,7	
2	$\Delta l/D$	0,44	2,77	5,35	927,3	0,535
	$\Delta S/S$	0,28	2,11	4,62	604,2	
3	$\Delta l/D$	0,4	2,6	5,19	838,6	0,547
	$\Delta S/S$	0,25	1,97	4,44	541,9	
4	$\Delta l/D$	1,51	7,14	8,18	2133,2	0,648
	$\Delta S/S$	0,85	4,4	6,92	1294,5	
5	$\Delta l/D$	0,44	2,77	5,35	750,8	0,513
	$\Delta S/S$	0,28	2,11	4,62	496,2	

Вертикальную составляющую силы предельного сопротивления Nu, кН, основания, сложенного дисперсными грунтами в стабилизированном состоянии, вычислялась при условии где b, $l = 1{,}0$ м; $\gamma_I = 17{,}65$, $\gamma_I^l = 16{,}67$, кН/м^3; d – 2,5, м; $\xi_\gamma = 0{,}75$, $\xi_\gamma = 2{,}5$, $\xi_\gamma = 1{,}3$.

Принятые значения коэффициентов N_γ, N_q, N_c, в зависимости от величины угла внутреннего трения и угла наклона к вертикали равнодействующей внешней нагрузки на основание F в уровне подошвы фундамента, а так же результаты расчетов вертикальной

составляющей силы предельного сопротивления по формуле (2) представлены в таблице 4.

В расчете угол наклона к вертикали равнодействующей внешней нагрузки на основание условно принят равным нулю.

Таблица 4. Принятые значения коэффициентов N_γ, N_q, N_c от величины угла внутреннего трения и угла наклона к вертикали равнодействующей внешней нагрузки на основание *F* в уровне подошвы фундамента (таблица 2) и результаты расчетов вертикальной составляющей силы предельного сопротивления по формуле 2

Table 4. Accepted values of the coefficients N_γ, N_q, N_c from the value of the angle of internal friction and the angle of inclination to the vertical of the resultant external load on the base F at the level of the foundation sole (table 2) and the results of calculations of the vertical component of the ultimate resistance force by formula 2

ИГЭ	ε_τ	N_γ,	N_q,	N_c	N_u, кН	Погрешность
1	$\Delta l/D$	4,85	9,21	18,71	2166,9	0,922
	$\Delta S/S$	2,08	5,12	12,81	1127,2	
2	$\Delta l/D$	2,36	5,56	13,50	2225,1	0,756
	$\Delta S/S$	1,13	3,5	10,19	1267,2	
3	$\Delta l/D$	2,02	5,02	12,66	1948,7	0,709
	$\Delta S/S$	1,01	3,26	9,77	1140,5	
4	$\Delta l/D$	23,87	29,72	42,28	10282,9	1,520
	$\Delta S/S$	7,3	12,36	22,79	4080,4	
5	$\Delta l/D$	2,36	5,56	13,50	1803,9	0,731
	$\Delta S/S$	1,13	3,5	10,19	1042,0	

Считаем однозначно неверным линейный подход при учете относительной деформации при тангенциальном силовом воздействии, поэтому рассчитываем погрешность исходя именно из этих соображений. Расчетное сопротивление грунта в результате подобной ошибки завышается в 1,5 раза, а вертикальной составляющей силы предельного сопротивления – в 1,5–2,5 раза.

Таким образом, из-за неоднозначной оценки относительной тангенциальной деформации возникают существенные отличия в результатах определения расчетного сопротивления грунта основания и вертикальной составляющей силы предельного сопротивления. Её определение площадным методом является более корректным, а среди рассмотренных способов её расчета рекомендуется второй способ как более простой.

В заключение необходимо отметить, что любые деформационные изменения в образце, на который выполняется воздействие, происходят во всем его объеме [8]. Нормальные воздействия производятся по вертикальному направлению и изменения в объеме происходят только по вертикальной составляющей z, поскольку стенки камеры жестко ограничивают деформацию по направлениям x и y. В случае с тангенциальным воздействием, происходящим по направлению x, деформация происходит по всем трем направлениям, причем, вертикальные изменения тем меньше, чем больше нормальное давление на образец. В данной статье вертикальное расширение при малой нормальное нагрузке; расширение с последующим сжатием в случае среднего воздействия и сжатие при большом нормальном воздействии не рассматривается. Тем не менее, надо понимать, что подобный учет необходим и весьма значим при оценке ошибок, возникающих при учете относительной деформации ***объема*** образца при тангенциальном воздействии.

Выводы

1. Использование при испытании грунтов для определения их прочностных характеристик при одноплоскостном срезе линейной оценки относительной тангенциальной деформации в виде отношения линейного сдвига Δl к диаметру

образца *D* некорректно, поскольку при цилиндрической форме образца относительную деформацию правильнее рассчитывать, как отношение площади сдвига к площади образца.

2. Предложен расчетный метод оценки относительной тангенциальной деформации.

3. Предельная линейная величина сдвига для испытаний грунтов на одноплоскостной сдвиг, установленная согласно требованиям ГОСТ 12248.1-2020 по достижению относительной деформации 0,1, меньше на 27 %, чем при подразумеваемом по умолчанию линейном варианте.

4. При линейном методе оценки относительной тангенциальной деформации расчетное сопротивление грунта, рассчитанное по методике СП 22.13330.2016 завышается в 1,5 раза, а вертикальной составляющей силы предельного сопротивления – в 1,5–2,5 раза.

Рекомендации

1. При подготовке новой редакции государственного стандарта «Грунты. Определение характеристик прочности методом одноплоскостного среза» однозначно указать правила расчета относительной тангенциальной деформации.

2. Включить в ГОСТ способ расчета относительной тангенциальной деформации, представленный вторым в настоящей статье.

Литература / References

1. Петраков А.А., Яркин В.В. Таран Р.А., Казачек Т.В Механика грунтов, Учебное пособие по курсу «Механика грунтов» / Петраков А.А., Яркин В.В., Таран Р.А., Казачек Т.В.; Под ред. Петракова А.А. Макеевка: ДонНАСА, 2004. 164 с.
2. Крамаренко В.В. Грунтоведение, Томский политехнический университет, Томск, 2011, 431 с.
3. Основания фундаменты и подземные сооружения. Под ред. Сорочана Е.А. Стройиздат,1985.480 с.
4. Мирный А.Ю., Идрисов И.Х. Испытания методом одноплоскостного среза, Геоинфо, 2020, 6 с.
5. Далматов Б.И. Механика грунтов, основания и фундаменты Стройиздат, Л. 1988, 415с.
6. Потапова Л.Б. Механика материалов при сложном напряженном состоянии. Как прогнозируют предельные напряжения? М.: «Издательство Машиностроение – 1», 2005. 244 с.
7. Зубова О.В., Виноградов А.Ю. Оценка влияния точности определения прочностных свойств грунта на результаты проектных расчетов// Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2025. Т. 7. Вып. 1. С. 103−110. DOI:10.34753/HS.2025.7.1.103.
   Zubova O.V., Vinogradov A.Yu. Assessment of the influence of the accuracy of determining the strength properties of the soil on the results of design calculations. Hydrosphere. Hazard processes and phenomena, 2025, vol. 7, iss. 1, pp. 103−110. DOI:10.34753/HS.2025.7.1.103. (In Russian; abstract in English).
8. Гольдштейн М.Н., Механические свойства грунтов. Издательство строительной литературы, М., 1971.
   Goldstein M.N., Mechanical Properties of Soils. Publishing House of Construction Literature, Moscow, 1971.

Поступила в редакцию / Received 16.10.2025
Принята к публикации / Accepted 02.12.2025

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

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

Войтенко Андрей Сергеевич, кандидат биологических наук, ведущий инженер, ООО НПО «Гидротехпроект», г. Валдай, Россия, https://orcid.org/0000-0003-1329-4573, e-mail: glavbiology@npogtp.ru.

Романов Георгий Павлович, руководитель проектов, ООО НПО «Гидротехпроект», г. Валдай, Россия, https://orcid.org/0000-0003-1363-9893, e-mail: gr.gtp@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexey Yu. Vinogradov, D.Sc. (Technical Sciences), director, NPO "Gidrotekhproekt", Valday, Russia, WoS ResearcherID: D3751-2016, https://orcid.org/0000-0001-8838-8676, e-mail: gd@npogtp.ru.

Viktor A. Obyazov, D.Sc. (Geography), technical director, NPO "Gidrotekhproekt", Valday, Russia, WoS ResearcherID: JBR-8590-2023, https://orcid.org/0000-0002-9644-1286, e-mail: td@npogtp.ru.

Andrey S. Voitenko, Ph.D. (Biology), lead engineer, NPO "Gidrotekhproekt", Valday, Russia, https://orcid.org/0000-0003-1329-4573, e-mail: glavbiology@npogtp.ru.

Georgiy P. Romanov, project manager of the NPO "Gidrotekhproekt", Valday, Russia, https://orcid.org/0000-0003-1363-9893, e-mail: gr.gtp@yandex.ru.

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

Научная статья / Scientific paper
УДК: 556.5+550.4
DOI: 10.34753/HS.2025.7.4.390

Перспективы применения в курортной отрасли природных гидроминеральных ресурсов соленых озер южной части Херсонской области

А.А. Турченко[1], С.Г. Запускалов[2], В.В. Чабан[1], Н.В. Гуськова[1]
[1] *Крымская гидрогеологическая режимно-эксплуатационная станция ГУНПП РК «Крымская ГГРЭС», г. Саки, Россия;*
[2] *Министерство курортов и туризма Херсонской области, с. Счастливцево, Россия*
e-mail: vic_84@list.ru

Аннотация. В данной статье приведены результаты исследований рапы и донных отложений ряда соленых озер южной части Херсонской области: оз. Геническое, оз. Соленое, оз. Лемурийское, оз. Присивашское и оз. Соколовское. В настоящее время данные озера используются в качестве рекреационных объектов для неорганизованного отдыха. Научные сведения о подтверждении лечебных свойств солёной воды (рапы) и донных отложений (грязи) этих озёр отсутствуют, однако водоёмы позиционируются многими СМИ как «целебные». Целью данной статьи является изучение возможности применения природных лечебных гидроминеральных ресурсов соленых озер юга Херсонской области в бальнеологической и курортной практике. Лабораторные исследования образцов выполнялись в Центральной испытательной лаборатории ГУНПП РК «Крымская ГГРЭС». На основании полученных данных о физико-химическом составе рапы и донных отложной озер в статье обсуждается возможность их хозяйственного освоения. Выводы о наличии в исследуемых озерах Херсонской области полезных для человека природных гидроминеральных ресурсов сделаны на основе сопоставления полученных результатов лабораторных исследований с действующими кондициями близких по составу ресурсов Сакского лечебного озера и других соленых озер, ресурсы которых применяются как в бальнеологической, так и в промышленной практике. Результаты исследований показали, что по установленным гидрохимическим параметрам рапа озер Херсонской области является близким аналогом рапы соленых озер Республики Крым, прежде всего Сакского лечебного озера и Сасык-Сиваш. Наиболее перспективное хозяйственное использование рапы исследованных озер – применение в бальнеологии и добыча соли. Донные отложения данных водоёмов классифицируются как иловые слабо-среднесульфидные лечебные грязи, перспективные для применения в бальнеологии и курортологии. Полученные выводы являются предварительными. Перед началом промышленной разработки природных гидроманалинеральных лечебных ресурсов соленых озер Херсонской области необходимо провести их детальную разведку и оценить терапевтические свойства.

Ключевые слова: бальнеология; донные отложения; курортология; рапа; соленые озера; гидроминеральные ресурсы.
Для цитирования: Турченко А.А., Запускалов С.Г., Чабан В.В., Гуськова Н.В. Перспективы применения в курортной отрасли природных гидроминеральных ресурсов соленых озер южной части Херсонской области // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2025. Т. 7. Вып. 4. С. 390–398. DOI: 10.34753/HS.2025.7.4.390.

Prospects for the Use of Natural Hydro-Mineral Resources of Salt Lakes in the Southern Part of the Kherson Region in the Resort Industry

Alexey A. Turchenko[1], Sergey G. Zapuskalov[2], Viktor V. Chaban[1], Natalia V. Guskova[1]
[1] *Crimean Hydrogeological Regulatory and Operational Station of the State Unitary Enterprise of the Republic of Crimea "Crimean Hydrogeological Research and Experimental Station", Saki, Russia;*
[2] *Ministry of Resorts and Tourism of Kherson Oblast, Shchaslyvtseve, Russia*
e-mail: vic_84@list.ru

Abstract. This article presents the results of a study on the brine and bottom sediments of several salt lakes in the southern Kherson region: Genicheskoe, Solenoe, Lemuriyskoye, Prisivashskoye, and Sokolovskoye lakes. Currently, these lakes are used as recreational sites for unorganized tourism. While scientific data confirming the therapeutic properties of the salt water (brine) and bottom sediments (mud) are lacking, many media outlets position these water bodies as "healing." This study aims to investigate the potential application of natural therapeutic hydro-mineral resources from salt lakes in southern Kherson for balneotherapy and the resort industry. Laboratory analyses were conducted at the Central Testing Laboratory of the Crimean Hydro-Geological Regime Operational Station. Based on the physicochemical data of the brine and bottom sediments, the article discusses the feasibility of their commercial development. Conclusions regarding the presence of beneficial natural hydro-mineral resources in the studied lakes are drawn by comparing the laboratory results with the existing standards for resources of similar composition, such as those from the Sakskoye therapeutic lake and other salt lakes used in balneological and industrial practices. The findings indicate that, according to the established hydrochemical parameters, the brine of the Kherson lakes is a close analogue to the brine of the salt lakes in Crimea, primarily Sakskoye and Sasyk-Sivash. The most promising commercial applications for the studied brine are balneotherapy and salt extraction. The bottom sediments are classified as low-to-medium sulfide silt therapeutic muds, suitable for use in balneology and health resort medicine. These findings are preliminary. Detailed exploration and clinical evaluation of therapeutic properties are required before commencing industrial development of the hydro-mineral resources in the Kherson region.

Keywords: balneology; bottom sediments; resortology; brine; salt lakes; hydromineral resources.

For citation: Turchenko A.A., Zapuskalov S.G., Chaban V.V., Guskova N.V. Prospects for the Use of Natural Hydro-mineral Resources of Salt Lakes in the Southern Part of the Kherson Region in the Resort Industry. Hydrosphere. Hazard processes and phenomena, 2025, vol. 7, iss. 4, pp. 390–398. DOI: 10.34753/HS.2025.7.4.390. (In Russian; abstract in English).

Введение

В южной части Херсонской области располагается большое количество соленых озер. Некоторые из них являются местными достопримечательностями и хорошо известны туристам, прежде всего те озера, которые рассоложены на Арабатской стрелке. Многие озера раньше использовали для добычи соли, а в настоящее время неорганизованные отдыхающие используют рапу и грязь для оздоровительных процедур без должного медицинского надзора[1] [1].

Обзор литературных и фондовых материалов показывает, что донные отложений некоторых из озер по физико-химическому составу и наличия полезных для организма человека макро и микрокомпонентов можно отнести к лечебным грязям. Рапы озер, так же могут представлять интерес при организации курортов медицинской направленности [2, 3].

Целью исследования является изучение современных физико-химических параметров рапы и донных отложений соленых озер юга Херсонской области для определения возможности применения природных лечебных гидроминеральных ресурсов озер в бальнеологической и курортной практике.

Методы

Объекты исследования выбраны на основе существующих материалов о их гидрохимических параметрах и географическому расположению, т.к. близость логистический путей и инфраструктурных объектов является важным фактором промышленного освоения месторождений.

Отобранные образцы рапы и доенных отложений анализировались в Центральной испытательное лаборатории ГУНПП РК «Крымская ГГРЭС».

[1] Солёные озёра [Электронный ресурс] // Сайт администрации Генического муниципального округа. URL: https://genichesk.gosuslugi.ru/o-munitsipalnom-obrazovanii/dostoprimechatelnosti/dostoprimechatelnosti_3.html. (дата обращения: 11.10.2025).

Оценка перспектив применения в бальнеологической практике рапы и донных отложений исследуемых озер Херсонской области выполнялась путем сопоставления полученных данных о физико-химическом состава с действующими кондициями близких по составу ресурсов Сакского лечебного озера. Восточный и Западный (лечебные) бассейны Сакского озера имеют статус месторождения, а промышленная добыча грязи ведется непрерывно с 1826 г. Терапевтическая ценность лечебных ресурсов Сакского озера подтверждена Специальными медицинскими заключениями.

Исследования выполнялись совместно с Министерства курортов и туризма херсонской области.

Результаты и обсуждение

Все изучаемые соленые озера расположены на юге Херсонской области (рисунки 1 и 2), эта территория относится к Приднепровской низменной равнине, являющейся южным продолжением Восточно-Европейской равнины [4]. Рельеф характеризуется крайней выровненностью: преобладающие высоты – 0–50 м над уровнем моря, с максимальными отметками до 70 м в районе Снигирёвки. На побережье Азовского моря развиты эоловые формы рельефа – песчаные косы (Криничанская, Долгая), дюны и барханы, сложенные морскими и аллювиальными отложениями [5].

Климат региона относится к умеренно-континентальному сухому, с жарким летом и мягкой зимой. Это степная климатическая область с недостаточным увлажнением. Летний период характеризуется длительными засухами.

В ветровом режиме доминируют северо-восточные и восточные ветры, усиливающиеся в весенне-летний период. Это способствует развитию пыльных бурь и дефляции почв, особенно на открытых полях без лесополос [6].



Рисунок 1. Район исследований
Figure 1. Research area

Главной водной артерией является река Днепр, низовья которой протекают по всей территории юга Херсонской области. До июня 2023 г. его сток регулировался Каховским водохранилищем – одним из крупнейших в Европе. Объём водохранилища составлял 18,2 км³, площадь – 2155 км. После разрушения плотины Каховской ГЭС в июне 2023 г. уровень воды в водохранилище и лимане резко снизился. По оценкам Института водных проблем РАН, «водохранилище фактически прекратило своё существование как единый гидротехнический объект, а Днепровский лиман вернулся к естественному солоноватоводному режиму».

На побережье Азовского моря распространены солончаки и лиманные озёра, такие как Камыши, Солёное, Малое Солёное. Они являются остатками древнего Сарматского моря и содержат хлоридно-сульфатные рассолы [7].

Озеро Геническое, расположено южнее города Геническ, возле поселка Приозерное. Параметры бассейна 4950×2900 м, площадь 10011950 м². Рапа – прозрачная жидкость, розового цвета, без запаха, pH 7,86. Минерализации рапы – 279 г/дм³. Содержание основных ионов в рапе: натрия и калия – 101,38 г/дм³, магния – 4,567 г/дм³, кальция –0,704 г/дм³, хлоридов – 166,69 г/дм³, сульфатов – 5,48 г/дм³, карбонатов – 0,0 г/дм³, гидрокарбонатов – 0,183 г/дм³. По химическому составу рапа озера Геническое относится к крепким рассолам хлоридного натриевого состава. Реакция среды слабощелочная.



Рисунок 2. Места расположения исследуемых озер
Figure 2. Locations of the studied lakes

Донные отложения озера представлены илами черного цвета имеющими пастообразную консистенцию, с запахом сероводорода; реакция среды pH 6,36, объемный вес грязи – 1,739 г/см³; влажность 38,0%; сопротивление сдвигу 7664 дин/см²; засоренность грязи минеральными частицами размером более 0,25 мм – 1,23 %; содержание сульфидов железа в грязях 0,28 % на сырую грязь, в том числе сероводорода – 0,11 %; минерализация грязевого раствора – 319,59 г/дм³, химический состав грязевого раствора – хлоридный магниево-натриевый. Грязевые залежи озера Геническое по своим физико-химическим свойствам относятся к соленасыщенным среднесульфидным слабощелочным иловым грязям.

По ряду признаков рапу озера Геническое можно рассматривать как близкий аналог озера Сасык-Сиваш, хозяйственное использование которого заключается в добычи морской соли, и Сакского лечебного озера, гидроминеральные ресурсы которого многие года успешно применяются в бальнеолечении. Характеристики донных осадков озера схожи с физико-химическими показателями лечебных грязей Западного бассейна Сакского месторождения

(в настоящее время относится к резервному участку), а также озера Карачи Новосибирской области (курорт Карачи).

Озеро Соленое расположено возле села Счастливцево, в районе Арабатской стрелки. Параметры бассейна 240×220 м, площадь 48943 м^2. Рапа – опалесцирующая, бесцветная жидкость, без запаха, pH 7,96. Минерализации рапы – 132,81 г/дм^3. Содержание основных ионов в рапе: натрия и калия – 41,15 г/дм^3, магния – 5,435 г/дм^3, кальция – 1,428 г/дм^3, хлоридов – 73,41 г/дм^3, сульфатов – 11,19 г/дм^3, карбонатов 0,02 г/дм^3, гидрокарбонатов – 0,183 г/дм^3. По химическому составу рапа пробы озера Соленое относится к рассолам хлоридного натриевого состава. Реакция среды слабощелочная.

Донные отложения озера представлены илами серого цвета, с запахом сероводорода; реакция среды pH 7,15, объемный вес грязи – 1,909 г/см^3; влажность – 28,92 %; сопротивление сдвигу – 1042 дин/см^2; засоренность грязи минеральными частицами размером более 0,25 мм – 13,3 %; содержание сульфидов железа в грязях 0,0 5% на сырую грязь, в том числе сероводорода – 0,02 %; минерализация грязевого раствора 127,62 г/дм^3, химический состав грязевого раствора – хлоридный магниево-натриевый.

Озеро Соленое можно рассматривать как аналог Сакского лечебного озера и использовать в части организации бальнеолечения.

Грязевые залежи озера Соленое по своим физико-химическим свойствам относятся к высокоминерализованным слабосульфидным слабощелочным иловым грязям [8]. Характеристики донных осадков озера Соленое не соответствуют физико-химическим показателям лечебных грязей Восточного бассейна Сакского месторождения, но схожи с физико-химическими показателями озера Чедер, Республика Тува (курорт Чедер). Следует учесть высокую засоренность илов минеральными частицами размером более 0,25 мм (13,3 %), что не соответствует требованиям, предъявляемым к лечебным грязям (<3%). Нельзя исключать, что высокая засоренность связанна с неудачным местом отбора пробы и при более детально обследовании водоема можно будет выделить продуктивные кондиционные участки.

Озеро Лемурийское (розовое) в районе с. Григорьевка. Параметры бассейна 56×52 м, площадь 1900 м^2. Рапа – опалесцирующая жидкость, розового цвета, без запаха, pH 7,93. Минерализации рапы – 195,79 г/дм^3. Содержание основных ионов в рапе: натрия и калия – 50,47 г/дм^3, магния – 15,40 г/дм^3, кальция – 0,20 г/дм^3, хлоридов – 104,50 г/дм^3, сульфатов – 24,58 г/дм^3, карбонатов – 0,069 г/дм^3, гидрокарбонатов – 0,57 г/дм^3. По химическому составу рапа пробы № 5 относится к крепким рассолам хлоридного магниево-натриевого состава. Реакция среды слабощелочная.

Донные отложения озера представлены илами светло-серого цвета, с запахом сероводорода, имеющими мягкую пастообразную консистенцию. Реакция среды pH 7,4, объемный вес грязи 1,660 г/см^3; влажность – 40,52 %; сопротивление сдвигу 13367 дин/см^2; засоренность грязи минеральными частицами размером более 0,25 мм – 1,42 %; содержание сульфидов железа в грязях – 0,08 % на сырую грязь, в том числе сероводорода – 0,03 %; минерализация грязевого раствора – 166,35 г/дм^3, химический состав грязевого раствора – хлоридный магниево-натриевый.

Рапу Лемурийского озера можно рассматривать как аналог рапы Сакского лечебного озера и использовать в организации бальнеолечения.

Грязевые залежи озера по своим физико-химическим свойствам относятся к соленасыщенным слабосульфидным слабощелочным иловым грязям [8]. Характеристики донных осадков Лемурийского озера не соответствуют физико-химическим показателям лечебных грязей Восточного бассейна Сакского месторождения, но схожи с физико-химическими показателями озера Медвежье Курганской области (курорт Медвежье).

Озеро Присивашское, в районе с. Люблинка. Параметры бассейна 12500×5800 м, площадь 44954981 м^2. Рапа – прозрачная жидкость, розового цвета, без запаха, pH 7,64. Минерализации рапы – 330,95 г/дм^3.

Содержание основных ионов в рапе: натрия и калия – 91,88 г/дм³, магния – 22,05 г/дм³, кальция – 0,31 г/дм³, хлоридов – 177,91 г/дм³, сульфатов – 38,22 г/дм³, карбонатов – 0,0 г/дм³, гидрокарбонатов – 0,58 г/дм³. По химическому составу рапа пробы № 10 относится к крепким рассолам хлоридного магниево-натриевого состава. Реакция среды слабощелочная.

Донные отложения озера представлены илами темно-серого цвета, с запахом сероводорода, имеющих мягкую пастообразную консистенцию. Реакция среды pH 7,03, объемный вес грязи – 1,818 г/см³; влажность – 31,91 %; сопротивление сдвигу – 2268 дин/см²; засоренность грязи минеральными частицами размером более 0,25 мм – 3,82 %; содержание сульфидов железа в грязях – 0,26 % на сырую грязь, в том числе сероводорода – 0,10 %; минерализация грязевого раствора 153,15 г/дм³, химический состав грязевого раствора – хлоридный магниево-натриевый.

По ряду признаков озеро Присивашское можно рассматривать как близкий аналог озера Сасык-Сиваш, хозяйственное использование которого – добыча морской соли, и Сакского лечебного озера, гидроминеральные ресурсы которого применяются в бальнеолечении.

Грязевые залежи озера по своим физико-химическим свойствам относятся к соленасыщенным среднесульфидным слабощелочным иловым грязям [8]. Характеристики донных осадков озера Присивашское схожи с физико-химическими показателями лечебных грязей Западного бассейна Сакского месторождения (в настоящее время относится к резервному участку), а также озера Карачи Новосибирской области (курорт Карачи). Следует учесть превышение значения засоренности илов минеральными частицами размером более 0,25 мм (3,82 %), что не соответствует требованиям, предъявляемым к лечебным грязям (<3 %). Для объективной оценки засорённости рекомендуется отобрать пробы в других частях озера или более глубоких слоях грязевой залежи.

Озеро Соколовское, в районе с. Ясная Поляна. Параметры бассейна 3200×1450 м, площадь 3158239 м². Рапа – прозрачная жидкость, с розовым оттенком, без запаха, pH 7,72. Минерализации рапы – 345,66 г/дм³. Содержание основных ионов в рапе: натрия и калия – 120,50 г/дм³, магния – 7,76 г/дм³, кальция – 0,23 г/дм³, хлоридов –185,69 г/дм³, сульфатов – 30,72 г/дм³, карбонатов – 0,00 г/дм³, гидрокарбонатов – 0,756 г/дм³. По химическому составу рапа пробы № 13 относится к крепким рассолам хлоридного натриевого состава. Реакция среды слабощелочная.

Таблица 1. Сравнение кондиций рапы Саксого лечебного озера с рапой озер Херсонской области
Table 1. Comparison of the conditions of the Sakskoye therapeutic lake brine with the brine of the lakes in the Kherson region

Показатели	Кондиции рапы Сакского лечебного озера	Результаты анализов проб рапы озер:				
		Геническое	Соленое	Лемурийское	Присивашское	Соколовское
Минерализация, г/дм³	60–330	279,00	132,81	195,79	330,95	345,66
pH	7,0–8,7	7,78	7,96	7,93	7,64	7,72
Натрий+калий, г/дм³	16–100	101,38	41,15	50,47	91,88	120,50
Магний, г/дм³	3,0–14,5	4,567	5,435	15,40	22,05	7,76
Кальций, г/дм³	0,2–2,4	0,704	1,428	0,20	0,31	0,23
Хлорид, г/дм³	30–180	166,69	73,41	104,50	177,91	185,69
Сульфаты, г/дм³	7–5	5,48	11,19	24,58	38,22	30,72
Карбонаты, г/дм³	< 0,08	0	0,02	0,069	0	0
Гидрокарбонаты, г/дм³	0,06–0,62	0,183	0,183	0,57	0,58	0,756

Донные отложения озера представлены илами темно-серого цвета, с запахом сероводорода, имеющих мягкую пастообразную консистенцию. Реакция среды pH 6,87, объемный вес грязи – 1,719 г/см^3; влажность – 36,64 %; сопротивление сдвигу – 4905 дин/см^2; засоренность грязи минеральными частицами размером более 0,25 мм – 7,97 %; содержание сульфидов железа в грязях – 0,15 % на сырую грязь, в том числе сероводорода – 0,06 %; минерализация грязевого раствора – 311,66 г/дм^3, химический состав грязевого раствора – хлоридный магниево-натриевый.

По ряду признаков озеро Соколовское можно рассматривать как близкий аналог озера Сасык-Сиваш, хозяйственное использование которого – добыча морской соли, и Сакского лечебного озера, гидроминеральные ресурсы которого применяются в бальнеолечении.

Грязевые залежи озера по своим физико-химическим свойствам относятся к соленасыщенным среднесульфидным слабощелочным иловым грязям [8]. Характеристики донных осадков озера Соколовское схожи с физико-химическими показателями лечебных грязей Западного бассейна Сакского месторождения (в настоящее время относится к резервному участку), а также озера Карачи Новосибирской области (курорт Карачи). Следует учесть превышение значения засоренности илов минеральными частицами размером 0,25–5,00 мм (7,97 %), что не соответствует требованиям, предъявляемым к лечебным грязям (<3 %) и значение засоренности илов минеральными частицами размером более 5,0 мм (0,54 %), при требовании к их отсутствию. Для объективной оценки засорённости необходимо отобрать пробы в других частях озера или более глубоких слоях грязевой залежи.

Для удобства сопоставления физико-химических параметров рапы и донных отложений озер Херсонской области с кондициями гидроминеральных ресурсов Сакского лечебного озера, составлены сравнительные таблицы (таблицы 1 и 2).

Таблица 2. Сравнение кондиций лечебных грязей Саксого лечебного озера с донными отложениями озер Херсонской области

Table 2. Comparison of the conditions of the therapeutic muds of the Sakskoye therapeutic lake with the bottom sediments of the lakes in the Kherson region

Показатель	**Кондиции лечебных грязей Сакского лечебного озера**	**Результаты анализов проб грязевой залежи в озерах:**				
		Геническое	**Соленое**	**Лемурий-ское**	**Присиваш-ское**	**Соколов-ское**
Минерализация грязевого раствора, г/дм^3	свыше 150	319,59	127,62	166,35	153,15	311,66
Содержание сульфидов железа в естественной грязи, %	свыше 0,50	0,28	0,05	0,08	0,26	0,15
Значение показателя реакции среды (ед. pH) грязи	от 7,0 до 9,0	6,36	7,15	7,4	7,03	6,87
Влажность, %	25–75	38	28,92	40,52	31,91	36,64
Засоренность минеральными включениями размером 0,25–5,0 мм, %	не более 3 от естественного вещества	1,23	13,3	1,42	3,82	7,97
Твердые минеральные включения размером более 5,0 мм, %	0	0	0	0	0	0,54

Выводы

По установленным гидрохимическим парамтерам рапа озер Херсонской области является близким аналогом рапы соленых озер Республики Крым, прежде всего Сакского лечебного озера и Сасык-Сиваш. Наиболее перспективное хозяйственное использование рапы исследованных озер – применение в бальнеологии и добыча соли. Донные отложения исследованных озер классифицируются как иловые слабо-среднесульфидные лечебные грязи, перспективные для применения в бальнеологии и курортологии. Полученные выводы являются предварительными и перед началом промышленной разработки природных гидроминеральных лечебных ресурсов соленых озер Херсонской области необходимо провести их детальную разведку и оценить терапевтические свойства.

Выполненные исследования подтвердили, что в гранитах Херсонской области рассоложены ценные природные ресурсы в виде рапы и грязей соленых озер, являющиеся важным фактором развития курортной отрасли региона.

Литература / References

1. Железняк Г.В., Гаворгян А.С. Развитие туристической инфраструктуры на территории Херсонской области // Вестник науки. 2025. Т. 3. № 3 (84). С. 355–361.
2. Склярук Д.И. Грязевые лиманы, озера, лагуны и заливы Черного и Азовского морей и условия их формирования. Геология побережья и дна Черного и Азовского морей в пределах УССР. К.: Изд-во Киевского ун-та, 1969. 380 с.
3. Чеханская Г.М. и др. Курортологическое обследование Николаевской и Херсонской области УССР: отчет по НИР / Украинский НИИ медицинской реабилитации и курортологии. Одесса, 1977.
4. Берг Л. С. Зоны, районы и типы почвенно-растительного покрова Советского Союза. Л.: Гидрометеоиздат, 1963. 320 с.
5. Морозова В. С. Геоморфология юга Европейской части СССР. М.: МГУ, 1961. 288 с.
6. Иванов М. М. Учение об увлажнении земной поверхности // Метеорология и гидрология. 1955. № 4. С. 89–95.
7. Мирчинк Г. Ф. Солёные озёра и солончаки СССР. М.: Географгиз, 1966. 184 с.
8. Михеева Л.С., Требухов А.Я. Критерии оценки качества лечебных грязей при их разведке, использовании и охране. М.: Минздрав СССР, 1987. 24 с.

Поступила в редакцию / Received 17.10.2025
Принята к публикации / Accepted 28.11.2025

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Турченко Алексей Анатольевич, директор, Крымская гидрогеологическая режимно-эксплуатационная станция ГУНПП РК «Крымская ГГРЭС», г. Саки, Россия, e-mail: director@sakilake.com.

Запускалов Сергей Геннадиевич, председатель Херсонского областного отделения Всероссийской общественной организации «Русское географическое общество», исполняющий обязанности министра курортов и туризма Херсонской области, Министерство курортов и туризма Херсонской области, с. Счастливцево, Россия, e-mail: jevseenko@khogov.ru.

Чабан Виктор Валерьевич, кандидат геологических наук, член-корреспондент Крымской академии наук, начальник отдела природных лечебных ресурсов и экологического мониторинга, Крымская гидрогеологическая режимно-эксплуатационная станция ГУНПП РК «Крымская ГГРЭС», г. Саки, Россия, e-mail: vic_84@list.ru.

Гуськова Наталья Владимировна, гидролог**,** Крымская гидрогеологическая режимно-эксплуатационная станция ГУНПП РК «Крымская ГГРЭС», г. Саки, Россия, e-mail: ggres@list.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexey A. Turchenko, director, Crimean Hydrogeological Regulatory and Operational Station of the State Unitary Enterprise of the Republic of Crimea "Crimean Hydrogeological Research and Experimental Station", Saki, Russia, e-mail: director@sakilake.com.

Sergey G. Zapuskalov, Chairman of the Kherson Regional Branch of the All-Russian Public Organization Russian Geographical Society, Acting Minister of Resorts and Tourism of the Kherson Region, Ministry of Resorts and Tourism of the Kherson Region, Shchastlivtsevo Village, Russia, e-mail: jevseenko@khogov.ru.

Viktor V. Chaban, Ph.D (Geology), Corresponding Member of the Crimean Academy of Sciences, Head of the Department of Natural Medicinal Resources and Environmental Monitoring, Crimean Hydrogeological Research and Operating Station of the State Unitary Enterprise of the Republic of Crimea "Crimean Hydrogeological Research and Operating Station", Saki, Russia, e-mail: vic_84@list.ru.

Natalia V. Guskova, hydrologist, Crimean Hydrogeological Regulatory and Operational Station of the State Unitary Enterprise of the Republic of Crimea "Crimean Hydrogeological Research and Experimental Station", Saki, Russia, e-mail: ggres@list.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, Д.О. Мельник
Подписано в печать 26.12.2025. Формат: 60x84/8
Бумага: офсетная. Печать плоская Усл. печ. л. 19,2. Тираж 50 экз. Заказ № ____
Выход в свет 26.12.2025
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





© 2025. «Гидросфера. Опасные процессы и явления». Все права защищены