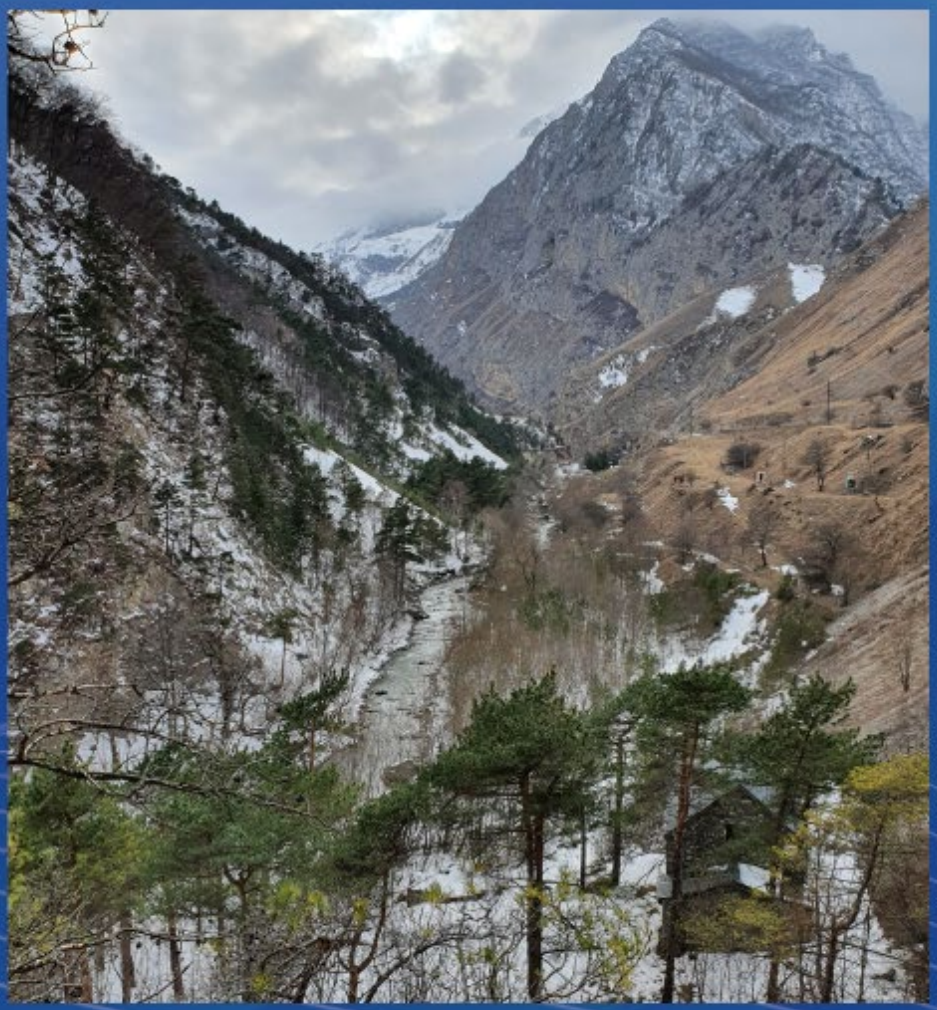
ISSN: 2686-7877 (print)
ISSN: 2686-8385 (online)

ГИДРОСФЕРА
ОПАСНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ

HYDROSPHERE
HAZARD PROCESSES AND PHENOMENA

www.hydro-sphere.ru



2026 Том 8 Выпуск 1



ГИДРОСФЕРА. ОПАСНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ

Том 8, Выпуск 1

Выходит 4 раза в год

ISSN 2686-7877 (print)

ISSN 2686-8385 (online)

Учредитель журнала

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

Главный редактор

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

Заместители главного редактора

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

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

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

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

Ответственный секретарь

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

HYDROSPHERE. HAZARD PROCESSES AND PHENOMENA

Volume 8, Issue 1

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

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)

Research Automation Tools of 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

МЕТОДЫ, МОДЕЛИ И ТЕХНОЛОГИИ 10

Порядковая классификация водоразделов – методические подходы и алгоритмы реализации в среде ГИС Б. И. Гарцман, С. В. Харченко, А. Л. Энтин, В. Ф. Толкачева 10

Концептуальные гидрологические модели HBV и GR4J: современные средства реализации и примеры использования А. М. Мирошниченко, К. И. Головнин 27

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ И ОПАСНОСТИ В ГИДРОСФЕРЕ 47

Адаптационные климатические проекты: обеспечение экологической безопасности в чрезвычайных ситуациях и решение инженерно-геологических проблем В. Н. Безносов, А. Ю. Виноградов, О. Е. Вязкова, В. А. Обязов, А. Л. Суздалева 47

ОПАСНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ГИДРОСФЕРЕ: ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ИНЖЕНЕРНЫЕ АСПЕКТЫ 60

Формирования и развития оползневых процессов на территории г. Москвы Е. А. Крахина, В. Н. Экзарьян 60

Природные и антропогенные факторы формирования наледей в пределах водосбора р. Чадан Л. А. Строкова 74

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ 87

Гидрохимический режим малых водоёмов урбанизированных территорий (на примере прудов г. Самары) О. Я. Червяцова, Д. С. Казадаев, Д. В. Киселёва, Т. Г. Окунева 87

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ 111

CONTENTS

METHODS, MODELS AND TECHNOLOGIES 10

Ordinal Classification of Watershed Ridgelines – Methodological Approaches and Implementation Algorithms in the GIS Environment Boris I. Gartsman, Sergey V. Kharchenko, Andrey L. Entin, Vasilisa F. Tolkacheva 10

Conceptual Hydrological Models HBV and GR4J: Modern Implementation Tools and Examples of Application Anton M. Miroshnichenko, Kirill I. Golovnin..... 27

ECOLOGICAL PROBLEMS AND HAZARDS IN THE HYDROSPHERE..... 47

Climate Adaptation Projects: Ensuring Ecological Safety in Emergency Situations and Solving Engineering-Geological Problems Viktor N. Beznosov, Alexey Yu. Vinogradov, Olga E. Vyazkova, Victor A. Obyazov, Antonina L. Suzdaleva..... 47

HAZARDOUS PROCESSES IN THE HYDROSPHERE: FUNDAMENTAL AND ENGINEERING ASPECTS 60

Formation and Development of Landslide Processes in Moscow Elena A. Krakhina, Vladimir N. Ekzaryan..... 60

Natural and Anthropogenic Factors of Icing Within the Chadan River Catchment Ludmila A. Strokova 74

HYDROLOGICAL REGIME OF WATER OBJECTS 87

Hydrochemical Regime of Small Water Bodies in Urban Areas (Using Samara City Ponds as an Example) Olga Y. Chervyatsova, Dmitry S. Kazadaev, Daria V. Kiseleva, Tatyana G. Okuneva..... 87

AUTHORS GUIDELINE 111

МЕТОДЫ, МОДЕЛИ И ТЕХНОЛОГИИ
METHODS, MODELS AND TECHNOLOGIES

Научная статья / Scientific paper
УДК: 551.4:571.6
DOI: 10.34753/HS.2026.8.1.10

Порядковая классификация водоразделов – методические подходы и алгоритмы реализации в среде ГИС

Б. И. Гарцман[1, 3]*, С. В. Харченко[2,4], А. Л. Энтин[1,2], В. Ф. Толкачева[1]
[1]Институт водных проблем РАН, Москва, Россия; [2]Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; [3]Институт природно-технических систем, Севастополь, Россия; [4]Институт географии РАН, Москва, Россия
*e-mail: gartsman@inbox.ru

Аннотация. Системное понимание взаимоотношений главных структурных линий рельефа речного бассейна – водотоков и водоразделов – представляет фундаментальный интерес для гидрологии суши и геоморфологии. Результаты обобщения методов выделения и порядковой классификации водоразделов выявляют два подхода к проблеме. Первый предполагает целостность системы главных структурных линий, сети водотоков и водоразделов рассматриваются как одноранговые, взаимоувязанные и топологически подобные. Наиболее известная реализация подхода – метод морфометрического анализа В. П. Философова, использующий «связанную» классификацию водоразделов на основе базовой классификации речной сети Хортона-Стралера. Метод продемонстрировал эффективность как инструмент решения научных и прикладных задач, имеет существенный потенциал методического и технологического развития на базе современных цифровых моделей рельефа (ЦМР) и ГИС. Второй подход основан скорее на интуитивных представлениях геоморфологов о водоразделах как основном каркасе рельефа и о необходимости различать водоразделы по их значимости либо выраженности. В его рамках выделение на карте водораздельной сети в виде древовидного графа по аналогии приводит к попыткам прямо применить к водоразделам схему нисходящей порядковой классификации, которая получается слабо связанной с классификацией водотоков. Развитие этого подхода может быть способом решения специальных задач геоморфологии, но для решения задач гидрологии и междисциплинарных целесообразно развитие «связанной» классификации В. П. Философова. Дополнение её принципом анализа путей добегания дает ряд существенно лучших свойств получаемых сетей водоразделов, с перспективой получения порядковых закономерностей морфометрических характеристик водоразделов, аналогичных «законам Хортона».

Ключевые слова: сеть водоразделов; порядок водотоков и водоразделов; пути добегания; порядковые закономерности; цифровая модель рельефа; Черноморское побережье Кавказа.
Для цитирования: Гарцман Б. И., Харченко С. В., Энтин А. Л., Толкачева В. Ф. Порядковая классификация водоразделов – методические подходы и алгоритмы реализации в среде ГИС // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2026. Т. 8. Вып. 1. С.10–26. DOI: 10.34753/HS.2026.8.1.10.

Ordinal Classification of Watershed Ridgelines – Methodological Approaches and Implementation Algorithms in the GIS Environment

Boris I. Gartsman[1,3]*, Sergey V. Kharchenko[2,4], Andrey L. Entin[1,2], Vasilisa F. Tolkacheva[1]
[1]Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; [2]Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; [3]Institute of natural and technical systems, Sevastopol, Russia; [4]Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
e-mail: gartsman@inbox.ru

Abstract. A systematic understanding of the basin's relief main structural lines relationships – streams and watershed ridgelines – is of fundamental interest to terrestrial hydrology and geomorphology. The results of a generalization of

methods for identifying and ordinally classifying ridgelines reveal two approaches to the problem. The first assumes the integrity of the system of main structural lines, stream and ridgeline networks are considered peer-to-peer, interconnected, and topologically similar. The most well-known implementation of this approach is V.P. Filosofov's morphometric analysis method, which uses a "linked" classification of ridgelines based on the Horton-Strahler river network classification system. This method has demonstrated its effectiveness as a tool for solving scientific and applied problems and has significant potential for methodological and technological development based on modern digital elevation models (DEM) and GIS. The second approach is based more on geomorphologists' intuitive understanding of watershed ridgelines as the basic framework of relief and the need to distinguish ridgelines by their significance or prominence. Within this framework, the identification of a ridgeline network on a map as a tree-like graph by analogy leads to attempts to directly apply a descending ordinal classification scheme to watershed ridgelines, which is weakly related to the classification of streams. Developing this approach can be a way to solve specific geomorphological problems, but for hydrological and interdisciplinary problems, the development of V.P. Filosofov's "linked" classification is advisable. Supplementing it with the principle of travel path analysis yields a number of significantly improved properties of the resulting ridgeline networks, with the potential to obtain ordinal patterns of watershed morphometric characteristics similar to "Horton's laws".

Keywords: ridgelines network; stream and ridgeline order; travel paths; ordinal patterns; digital elevation model; Black Sea coast of the Caucasus.

For citation: Gartsman B. I., Kharchenko S. V., Entin A. L., Tolkacheva V. F. Ordinal Classification of Watershed Ridgelines – Methodological Approaches and Implementation Algorithms in the GIS Environment. Hydrosphere. Hazard processes and phenomena, 2026, vol. 8, iss. 1, pp. 10–26. DOI: 10.34753/HS. 2026.8.1.10. (In Russian; abstract in English).

Введение

Структурно-гидрографический анализ речных систем, как научное направление, развивается на стыке гидрологии суши и геоморфологии. Фокусом настоящего исследования является попытка системного понимания взаимоотношений основных структурных линий рельефа речного бассейна – водотоков и водоразделов, что представляет фундаментальный интерес для обеих упомянутых дисциплин.

Нисходящая порядковая классификация водотоков, образующих речные системы, в настоящее время может рассматриваться как базовая концепция гидрологии суши. Начиная с основополагающих работ Р. Хортона [1], предложен целый ряд вариантов таких классификаций, которые объединяют два общих положения: первый порядок присваивается первичному водотоку, протяжением от истока до слияния с любым другим водотоком; порядки водотоков нарастают при движении сверху вниз по току воды в системе. Нарастание порядка в разных классификациях происходит по различным правилам, но всегда в соответствии с естественным процессом концентрации речного стока, увеличением масштаба речной системы и выраженности проявлений системообразующих процессов в ней. Эта закономерность многообразно проявляется в виде известных «законов Хортона», т.н. индикационных зависимостей, и в иных формах [1–5].

В геоморфологии одним из основоположников концептуально-оформленного подхода к порядковой классификации как фундаментальному и притом практичному, методическому инструменту, следует считать В. П. Философова [6]. Особенностями геоморфологического виденья проблемы являются, во-первых, рассмотрение вместо сети водотоков сети «долин» (собственно – их тальвегов) [7]. В дальнейшем из соображений удобства будем употреблять термины «водотоки» и «тальвеги» как синонимы, обозначающие одни те же структурные линии рельефа. Во-вторых, изначально рассматриваются именно взаимосвязанные сети тальвегов и водоразделов как равно значимые элементы рельефа, что не характерно для гидрологического подхода.

Появление в течение последних 30 лет общедоступных детальных цифровых моделей рельефа (ЦМР), а также средств их обработки в виде ГИС, создало широкие возможности развития данного научного направления и практического применения его результатов. Очевидной потребностью для реализации этих возможностей является разработка специализированных

инструментов обработки ЦМР. Менее очевидной, но еще более насущной видится необходимость решения ключевых методических проблем, в частности, касающихся автоматического построения и порядковой классификации сетей водотоков и водоразделов по ЦМР средствами ГИС [8–10]. Необходима систематизация имеющихся методик порядковой классификации водоразделов, в особенности тех, которые могут быть реализованы в виде алгоритмов автоматизированной обработки ЦМР. Нами собраны, частично адаптированы, а частично разработаны, ряд таких алгоритмов, которые сопоставлены на примере анализа рельефа трех речных бассейнов Черноморского побережья Кавказа, представляющих широкий диапазон ландшафтных условий. На основе сопоставления сделаны выводы о корректности разных алгоритмов и перспективах разработки инструмента, решающего сформулированную выше задачу.

Материалы и методы исследования

Статья известного математика Артура Кейли, вышедшая в 1859 г. [11], возможно, является наиболее ранней научной публикацией, в которой ставится задача формализованного анализа взаимосвязей тальвеговых и водораздельных линий. В ней рельеф рассматривается строго математически, как поле высот, заданное системой пересекающихся в каждой точке под прямым углом линий одинаковых высот (горизонтали) и максимальных уклонов (линии падения). В таком рельефе присутствуют топологически симметричные точки – узлы локальных положительных и отрицательных экстремумов, а также седловидные узлы. Линии водоразделов и тальвегов наследуют топологическую симметричность, соединяя экстремумы (вершины и впадины, соответственно) и пересекаясь в седловидных узлах. Таким образом, водоразделы и тальвеги предстают в анализе как единая система *вторичных* структурных линий рельефа, в то время как в современной геоморфологии их принято рассматривать как *главные* [12], отражающие ключевые особенности структурной организации поверхности.

Работы географа-математика Кристиана Вернера [13–15] представляют едва ли не единственный пример развития теоретической модели взаимосвязанных сетей водотоков и водоразделов в пределах речного бассейна с их порядковой классификацией. Рассматривается только плановый рисунок сетей как топологическая и геометрическая конструкция, т.е. также формально математически, но с позиций не теории поля, а теории графов. Рассмотрение характеризуется строгой формализацией и взаимным соответствием сетей – количество элементов 1-го порядка и старший порядок у них совпадают (рисунок 1). Строгость модели, составляет несомненное её достоинство, в частности, позволяя выполнять формальное исчисление элементов сетей.

Однако, эти же свойства модели Вернера определяют и основной её недостаток. Поскольку характер физических процессов, формирующих сети водотоков и водоразделов, принципиально различен, то строгая топологическая симметрия присвоения им порядков явно избыточна. Яркое проявление этого – достижение старшего порядка водораздела в единственной точке, топологически симметричной точке замыкающего створа водотока старшего порядка (рисунок 1б). Расположение этой топологически уникальной точки на внешнем водоразделе бассейна относительно случайно, и никакими уникальными физическими свойствами она не обладает. Интуитивно ожидается противопоставление протяженного водотока старшего порядка протяженному же отрезку «главного» водораздела бассейна, имеющему тот же порядок.

Порядковые классификации водотоков показали свою эффективность как инструмент организации и «свертки» информации для индикационного оценивания гидрографических и гидрологических параметров неизученных бассейнов. В то же время, в отношении водоразделов порядковые классификации в гидрологии практически не рассматривались. Интерес представляют возможности подобной классификации водоразделов прикладного характера, ориентированной на автоматизированный анализ реального рельефа по ЦМР. Обзор пригодных методических подходов и разработок целесообразно начать с анализа концепции В. П. Философова.

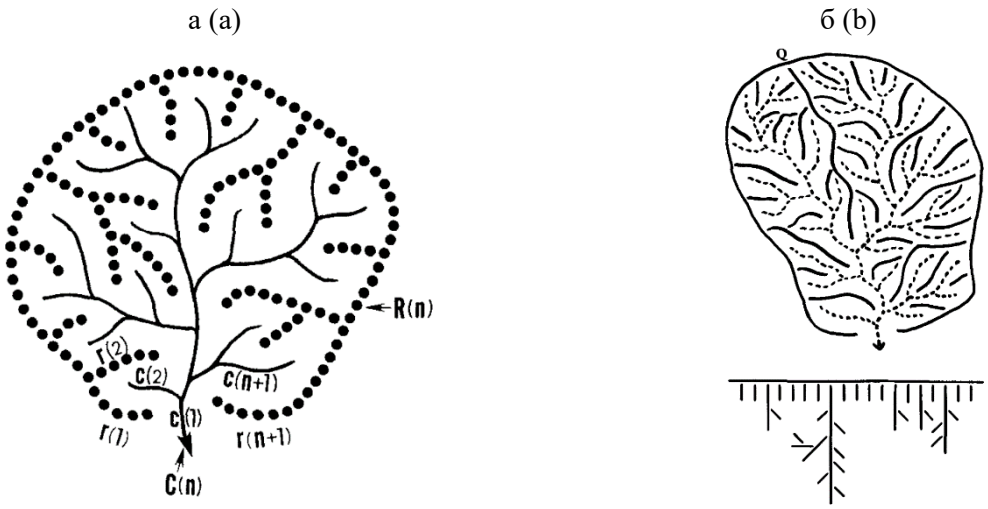


Рисунок 1. Иллюстрации к модели взаимосвязанных сетей водотоков и водоразделов К. Вернера: а – схема взаимосвязанных сетей водоразделов и водотоков бассейна с чередующимися внешними элементами [14]; б – вверху – схема сети водотоков, внешнего водораздела, внутренних водоразделов; внизу – схематизированный граф, отображающий сеть водоразделов, внешнего и внутренних [13]

Figure 1. Illustrations of C. Werner's coupled stream and watershed network model: a – schematic of coupled watershed and stream networks within a basin with alternating external elements [14]; b – top: schematic of a stream network, external watershed, and internal watersheds; bottom: schematic graph representing the network of external and internal watersheds [13]

Морфометрический метод

Морфометрический метод анализа рельефа В. П. Философова [6, 7, 16] включает построение разнопорядковых базисных и вершинных поверхностей путем интерполяции высот тальвегов и водоразделов, классифицированных по порядкам Хортона-Стралера. Далее эти поверхности содержательно анализируются, а также служат для построения специальных карт (карты остаточного рельефа, карты сноса и т.п.). Основанием построений служит гипотеза, что структурные линии и соответствующие им поверхности более высоких порядков отвечают более древним стадиям развития рельефа под влиянием флювиальных и склоновых процессов.

Практика применения метода показывает, что порядковая классификация тальвегов в нем имеет ясное концептуальное основание, а алгоритм её применения и построения на её основе порядковых базисных поверхностей легко реализуется и широко применяется. Напротив, концептуальные основания порядковой классификации водоразделов представляются неясными, и алгоритм её применения в представлениях В. П. Философова существенно эволюционируют и в целом остается двойственным.

В ранних работах [7, 16] предлагается построение на карте водоразделов, разделяющих все тальвеги, фактически – путем экспертного анализа. После этого порядковая классификация сети водоразделов выполняется аналогично сети водотоков, т.е. выделяются первичные неразветвленные участки 1-го порядка, а все высшие порядки формируются при попарном соединении участков предшествующего порядка. Однако логика такой классификации, описанная выше и интуитивно очевидная для сети водотоков, в применении к сетям водоразделов отсутствует. Водораздельные линии не являются результатом сосредоточенного и нарастающего продольного воздействия потока вещества и энергии, напротив – водоразделы формируются рассредоточенными воздействиями, направленными в субпоперечных их простиранию направлениях.

Представляется, что порядковые закономерности для водоразделов (если таковые существуют) формируются вследствие порядковой структуры водотоков и отображают её. Соответственно, порядковые классификации

водоразделов и водотоков должны быть тесно связаны между собой. Основная методическая работа В. П. Философова [6] уже представляет два подхода к классификации водоразделов, один из которых назван «дихотомическим» – он изложен выше. Сам автор отмечает, что его недостатком является независимость назначения порядков тальвегов от порядков водоразделов и их возможное несоответствие, что затрудняет интерпретацию результатов.

В качестве альтернативы описана «связанная» классификация водоразделов, основанная на предположении, что водораздельная линия, оконтуривающая водосбор и замыкающаяся на устье водотока определенного порядка, имеет порядок этого водотока. При этом, поскольку водораздельные линии разнопорядковых сегментов гидрографической сети могут многократно перекрываться, то отдельные их фрагменты могут получать целые наборы порядков – таким фрагментам присваивается старший порядок из набора. Эта методика широко использовалась ранее [17–19], но применяется и поныне [20, 21] для реконструкции положения разнопорядковых вершинных поверхностей.

Именно «связанную» порядковую классификацию водоразделов соотносят обычно с именем Философова, в то время как «дихотомическая» классификация, аналогичная классификации водотоков, считается как бы самоочевидной. Отметим, что основное внимание в морфометрическом методе уделяется построению полипорядковых [6] вершинных (и базисных) поверхностей, где поверхность порядка *N* проходит через водоразделы порядка *N* и всех более высоких порядков. Это сильно сглаживает эффекты методических противоречий в порядковых классификациях. Однако далее В. П. Философов признает и целесообразность построения монобазисных и моновершинных поверхностей (по тальвегам и водоразделам одного порядка) [6, стр. 69], для которых эффекты независимой классификации тальвегов и водоразделов могут стать критическими, а содержательная интерпретация результатов – невозможной.

Анализ водоразделов на основе инвертированного рельефа.

Классификация водоразделов сетей по «дихотомическому» принципу сравнительно широко применяется в наиболее просто реализуемой форме – путем обработки инвертированной ЦМР. Сеть водоразделов строится как сеть водотоков на инвертированном (обращенном) рельефе по стандартной процедуре современных ГИС на основе отбора ячеек сети по пороговому значению показателя, аналогичного водосборной площади [22], с вычислением порядка по системе Хортона-Стралера. При этом параметр построения – пороговая водосборная площадь, – на инвертированной ЦМР аналогична предельной рассеивающей площади на склонах, т.е. вне гидрографической сети [22, 23]. Изменяя величину этого параметра, можно варьировать как валовые характеристики полученной сети водоразделов (суммарную длину, густоту и др.), так и её порядковую структуру.

Кроме того, что любая «дихотомическая» классификация водоразделов не обеспечивает «связанность» с классификацией водотоков, данный вариант построения обладает еще и специфическим недостатком. Поскольку инструменты ГИС для построения речной сети разработаны именно для анализа флювиального рельефа, а рельеф инвертированной ЦМР таковым не является, то корректность работы всей процедуры не обеспечена. Наиболее очевидные её нарушения связаны с массой замкнутых «понижений рельефа» (на деле являющихся одиночными вершинами), которые существуют и на реальных ЦМР, для чего имеется специальный инструмент их заполнения – получения т.н. гидрологически-корректной ЦМР. Для реального флювиального рельефа это связано лишь с незначительной коррекцией, практически не влияющей на локализацию водотоков. Для инвертированного же рельефа объем и площадь заполненных «понижений» велики, что сказывается на локализации и высотных характеристиках полученной сети водоразделов.

Анализ водоразделов на основе показателя Bmax

Большой интерес представляет оригинальная методика выделения и

классификации водоразделов по ЦМР, предложенная Линдси и Сейбертом в 2013 году [24]. Она похожа на предыдущую в смысле отсутствия «связанности» порядков водотоков и водоразделов, но не имеет важных её недостатков. Водоразделы выделяются на основе морфометрической величины (параметра) *Bmax*, которая равна максимальному расстоянию по линиям тока между каждой ячейкой ЦМР и каждой из 8 ячеек её ближайшего окружения. То есть, из данной ячейки и каждой из 8 соседних вычисляется суммарная длина пары линий тока до точки их слияния, затем из 8 значений суммарной длины выбирается максимальное значение (*Bmax*), которое приписывается данной ячейке. Если все соседи данной ячейки расположены в пределах одного склона, то *Bmax* будет невелико. Но если данную ячейку и хотя бы одну соседнюю разделяет значимый водораздел, значение *Bmax* будет высоким.

Bmax используется как континуальный морфометрический параметр, представляющий меру «водораздельности» в каждой ячейке ЦМР. Переход от значений *Bmax* к дискретным порядкам водораздельных линий авторами методики не рассматривался. Нами для этого подбиралось пороговое значение *Bmax*, на основании которого выделялась растровая водораздельная сеть, аналогично тому, как речная сеть выделяется на основании порогового значения площади водосбора. Полученная таким образом древовидная сеть классифицировалась по порядкам Хортона-Стралера. Подчеркнем, что эта дополнительная обработка применялась нами для получения результата, пригодного для сравнения с результатами других методик. Методика, основанная на *Bmax*, выгодно отличается наличием ясного физического принципа для определения значимости водоразделов. Однако применение к полученной сети водоразделов «дихотомической» схемы классификации приводит опять к противоречию – фрагменты водоразделов с высоким порядком могут иметь невысокие значения *Bmax* и наоборот.

Классификация водоразделов на основе путей добегания

Существенным недостатком алгоритма «связанной» классификации Философова является переход водоразделов всех порядков на оконечностях хребтов от линий гребней к линиям ребер, спускающихся в долины и пересекающих линии тальвегов [18]. Соответственно, вершинные поверхности проходят через точки замыкающих створов разнопорядковых водотоков, пересекаясь в них с базисными поверхностями. Рациональным представляется прохождение водораздельных линий по междуречным поверхностям, без спуска в долины и пересечения их. Методики с использованием инвертированной ЦМР и параметра *Bmax* свободны от этого противоречия – сети водоразделов и водотоков не пересекаются и не касаются друг друга в силу самих способов их построения.

Таким образом, проблему можно сформулировать в виде вопроса: «Возможно ли построить систему водоразделов в рамках представлений о целостной системе структурных линий рельефа речного бассейна и выполнить порядковую классификацию водоразделов на основе физических принципов при соблюдении однозначной её связи с порядковой классификацией водотоков?». Фактически речь может идти о развитии «связанной» классификации водоразделов В. П. Философова с дополнением её концепции физически-обоснованным принципом.

Положительный ответ на этот вопрос дан в работах [8, 9], где, как представляется, предложен адекватный алгоритм. Как и для «связанной» классификации В. П. Философова, в основе рассмотрения находится водоток порядка *N* речной сети, который имеет бассейн порядка *N*, ограниченный внешней водораздельной линией до замыкающего створа. Однако не всей этой водораздельной линии присваивается порядок *N*, а лишь той ее части, которая связана с замыкающим створом путями добегания порядка *N*. Путь добегания – линия тока условной капли дождя, построенная от точки выпадения на водосборе до замыкающего створа и выраженная через последовательность порядков водотоков, слагающих эту линию.

Путь добегания порядка *N* содержит непрерывную последовательность участков *x0* → *x1* → *x2*.... → *xN-1* → *xN*, где *x0* – участок

движения по склону, *xi* – участок движения по водотоку порядка *i*. Вообще, на водосборе порядка *N* любой путь добегания будет начинаться с *x0* и заканчиваться *xN*, однако порядок *N* будут иметь лишь те пути, в которых последовательность всех порядков непрерывна. И только те участки водораздельной линии бассейна порядка *N*, от которых начинаются пути добегания порядка *N*, образуют водораздел порядка *N*. Такое правило классификации водоразделов является «жестким», в качестве альтернативы которому сформулировано более «мягкое». Для выделения участков водораздела порядка *N* вместо только путей добегания порядка *N* могут быть использованы все пути с наличием «триплета» порядка *N*, то есть оканчивающихся последовательностью ..... → *xN-2* → *xN-1* → *xN*. В случае, если ни одного «триплета» (последовательности трех подряд порядков) в общем пути добегания нет, то его порядок будет равен 1 или отсутствовать – в зависимости от последовательности начальных звеньев.

Основания и особенности применения двух описанных правил подробнее обсуждаются в [8]. В обоих случаях в результате формируется сеть разнопорядковых водоразделов, старший порядок которой равен старшему порядку сети водотоков. Предлагаемая схема является развитием «связанной» классификации Философова, дополняя её физически-обоснованным принципом путей добегания, сходным с тем, на котором основан расчет показателя *Bmax*.

Выделение и классификация водоразделов выполняется авторским программным инструментом Ridgelines Network Orders[1], разработанном для среды ArcGIS Desktop [9]. Результатом его работы является набор пространственных данных линейной геометрии, в котором представлена сеть водоразделов водосборов всех порядков в пределах обрабатываемого бассейна. Сеть состоит из сегментов линий, через каждый из которых проходят водоразделы многих вложенных и соседствующих водосборов, и для каждого сегмента записывается последовательность порядков всех проходящих через него водоразделов. Путем переклассификации этой последовательности для каждого сегмента, соответственно описанным выше схемам, получаем итоговые порядки – по «связанной» классификации В. П. Философова *Nf*, по полному пути добегания *Np* и по «триплету» старшего порядка *Nt* (таблица 1).

Описанные выше алгоритмы анализа водоразделов, основанные на обработке инвертированной ЦМР и на расчете показателя Bmax, реализованы в среде ГИС Whitebox Tools. Подбор калибруемых параметров в обоих алгоритмах выполнен таким образом, чтобы полученные сети имели одинаковый старший порядок, совпадающий со старшим порядком речной сети каждого бассейна. В итоге создан инструментарий получения на каждый бассейн пяти вариантов сетей водоразделов, классифицированных по порядкам, что позволяют сравнивать результаты применения различных алгоритмов.

В качестве тестовых объектов апробации описанных подходов выбраны бассейны трех рек, гидрологические и морфологические характеристики которых являются типовыми для южного склона Западного и Северо-Западного Кавказа – Туапсе, Шахе и Мзымты. Бассейны расположены на 150-километровом отрезке южного макросклона Большого Кавказа и имеют площади, соответственно, 352, 553 и 885 км^2. Рельеф всех трех бассейнов низко- и среднегорный, максимальные отметки главных водоразделов каждого бассейна нарастают с севера на юг, для Туапсе – 1410 м, Шахе – 2530 м, Мзымты – 3210 м. Геологическое строение сходное, с поверхности залегают флишевые толщи (от средней юры до верхнего мела), с чередованием известняков, песчаников, мергелей, встречаются глинистые сланцы, аргиллиты. В связи с высокими показателями годового количества осадков (1000–3000 мм), высокой степенью выветренности осадочных толщ с поверхности, значительными уклонами и

[1] ArcPyStreamScape – A set of ArcGIS Desktop scripts for river system structure analysis. https://github.com/aentin/ArcPyStreamScape

общей энергией рельефа – рельеф рассматриваемых бассейнов моделируется мощными эрозионно-денудационными (в первую очередь, флювиальными и склоновыми) процессами.

Таблица 1. Переклассификация последовательности порядков сегментов водоразделов в целевое значение (для сети 5-го порядка)

Table 1. Reclassification of watershed segment order sequences into target values (for a 5th-order network)

Последовательность порядков пути добегания для фрагмента сети водоразделов	Порядок после переклассификации по правилу		
	«связанной» классификации Философова N_f	полного пути добегания N_p	«триплета» старшего порядка N_t
54321	5	5	5
54320*	5	-	5
54301	5	1	5
54300	5	-	5
54021	5	2	2
54020	5	-	-
54001	5	1	1
54000	5	-	-
50321	5	3	3
50320	5	-	-
50301	5	1	1
50300	5	-	-
50021	5	2	2
50020	5	-	-
50001	5	1	1
50000	5	-	-
04321	4	4	4
04320	4	-	4
04301	4	1	1
04300	4	-	-
04021	4	2	2
04020	4	-	-
04001	4	1	1
04000	4	-	-
00321	3	3	3
00320	3	-	-
00301	3	1	1
00300	3	-	-
00021	2	2	2
00020	2	-	-
00001	1	1	1

*– «0» обозначает отсутствие участка данного порядка в последовательности порядков пути добегания

Определение положений водоразделов выполнено на основе фрагментов ЦМР FABDEM. Эта ЦМР создана на основе покрытия Copernicus GLO-30, полученного путём радиолокационной интерферометрии; для этого покрытия была проведена корректировка смещений высот, обусловленных растительным покровом, зданиями и сооружениями [25]. Пространственное разрешение FABDEM составляет 1″, для вычислений было произведено перепроецирование фрагментов в систему координат UTM (зона 37) на основе датума WGS84 и обрезка полученных растров по контурам водосборных бассейнов соответствующих рек. Размер ячейки полученных растров составил 23 м.

Результаты и обсуждения

На рисунке 2 приводится пример сопоставления трех вариантов «связанной» классификации водоразделов, соответствующих описанным в таблице 1 схемам, и двух вариантов «дихотомической» классификации – с использованием инвертированной ЦМР и показателя *Bmax*. Концептуальные различия двух анализируемых подходов выражаются в очевидной разнице общей формы получаемых водораздельных сетей.

Детальное сравнение трех вариантов «связанной» классификации водоразделов выполнено расчетом суммарной длины совпадений/несовпадений порядков сегментов водоразделов по разным вариантам (таблица 2). При этом фрагментам водоразделов с любым порядком по одному из сравниваемых вариантов, а по второму не классифицированных, назначался порядок 0 по второй классификации. Водораздельные линии, не имеющие порядка в обеих сравниваемых вариантах, не учитываются.

Анализ рисунка 2 и таблицы 2 позволяет на примере бассейна р. Шахе выявить закономерности соотношений «связанных» вариантов классификации. На рисунке 2а наглядно виден отмеченный выше недостаток классификации В. П. Философова. Водораздел старшего порядка проходит по границе бассейна старшего порядка в виде замкнутой линии, объединяя разнородные по морфометрии и положению в рельефе участки, которые рационально было бы отнести к различным порядкам. Также этот водораздел пересекает долину водотока старшего порядка и сам этот водоток в замыкающем створе. То же присуще водоразделам меньших порядков, с поправкой на их фрагментированность. Водораздельная сеть на рисунке 2а состоит из многочисленных циклических ветвей, принципиально отличаясь от древовидной сети водотоков, причем сети пересекаются во всех замыкающих створах водотоков всех порядков.

Таблица 2. Соответствие порядков водоразделов в различных классификациях по протяженности (км), бассейн р. Шахе

Table 2. Correspondence of watershed orders across different classifications by length (km), Shakhe River basin

Порядки водоразделов		**По В. П. Философову**					**По старшему «триплету»**				
		1	**2**	**3**	**4**	**5**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
По полному пути	0		136	36,0	4,58	1,89				0,18	0,62
	1	932		24,7	9,78	18,5	984				1,15
	2		236		5,22	40,8		282			
	3			70,9		59,5			130		
	4				34,3					34,3	
	5					73,2					73,2
По старшему «триплету»	0		136	36,0	4,39	1,26					
	1	932		24,7	9,78	17,4					
	2		236		5,22	40,8					
	3			70,9		59,5					
	4				34,5						
	5					75,0					

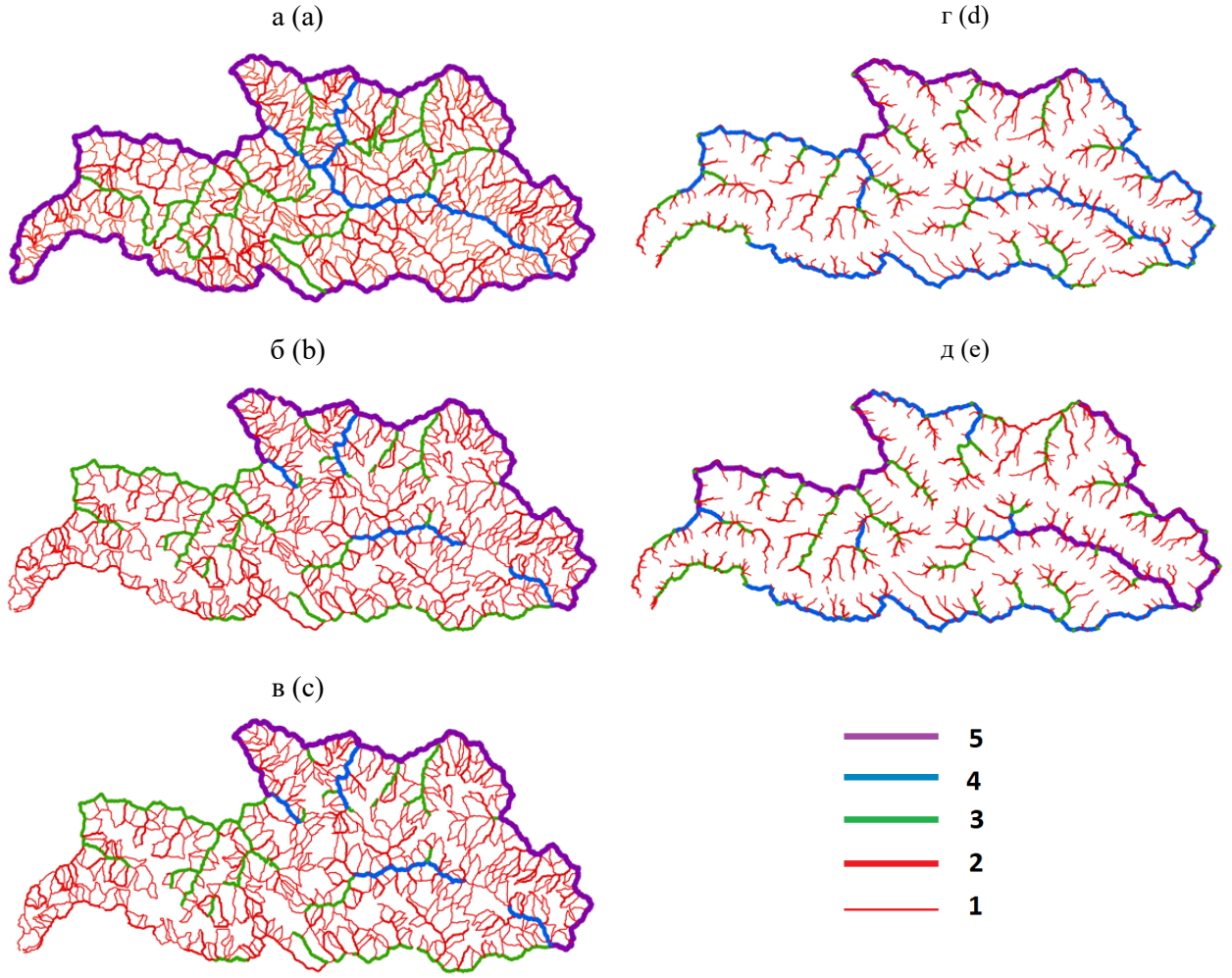


Рисунок 2. Результаты автоматического выделения сети водоразделов бассейна р.Шахе (*N*=5) в пяти вариантах порядковой классификации: а – по В.П.Философову; б – по полному пути добегания; в – по старшему «триплету»; г – по инвертированному рельефу; д – по показателю B_{max}. Цвета соответствуют порядкам с 1-го по 5-й

Figure 2. Results of automated watershed network delineation for the Shakhe River basin (*N*=5) across five ordinal classification variants: a – according to V.P. Filosofov; b – by total flow travel time; c – by the highest "triplet"; d – by inverted relief; e – by the Bmax index. Colors correspond to orders 1 through 5

Сети водоразделов на рисунках 2б,в выглядят гораздо рациональнее. Они демонстрируют постепенный рост порядков водоразделов по мере их удаления от замыкающего створа, с достижением старшего порядка вблизи интуитивно определяемого «главного» водораздела, окаймляющего верховья водотока старшего порядка. Водоразделы низших порядков расположены аналогично. Сети водоразделов демонстрируют общую топологическую симметрию по отношению к сетям водотоков, подобную представленной на рисунке 1. При этом водоразделы всех порядков, кроме 1-го, не замкнуты и не пересекают долины и водотоки.

Из таблицы 2 видно, во-первых, что сеть по классификации В.П. Философова превышает два других варианта по протяженности на 10,6 и 10,7 % (при всех сравнениях большая протяженность берется за 100 %). Это обусловлено алгоритмом этой классификации, учитывающим все водораздельные линии целиком, без исключений. Во-вторых, в соответствии с тем же алгоритмом (см. таблицу 1), порядок любого сегмента водораздела *Nf* может быть только равен или больше, чем *Np* и *Nt*. Явно преобладают сочетания *Nf* = *Np* и *Nf* =*Nt* – 80,0 % и 80,1 % протяженности сети, соответственно. Третьей

интересной особенностью таблицы 2 является полное отсутствие сочетаний порядков $Nf = Np+1$ и $Nf = Nt+1$, что отражено и в таблице 1 – видно, что порядок по полному пути или старшему «триплету» не может быть на единицу меньше, чем порядок по В. П. Философову.

Сопоставление классификаций по полному пути и по старшему «триплету» (см. таблицу 2) показывает их почти полное совпадение. Сеть по старшему «триплету» несущественно длиннее, поскольку в ней лишь три сегмента с $Np=0$ приобретают высокие значения Nt. Вообще Nt всегда либо равен, либо больше Np, при этом доля протяженности сегментов с $Nt=Np$, составляет практически 100 %. Различия вариантов связаны с формированием «молодых» низкопорядковых эрозионных врезов вблизи основных водоразделов, что местами нарушает полные пути добегания. Для рассматриваемых бассейнов это редкое явление, но для других условий оно может быть распространенным, а соответствующие различия в сетях – существенными [8].

В таблице 3 даны сводные данные по сопоставлению всех вариантов классификации для всех трех исследуемых бассейнов. Следует отметить, что варианты «связанной» и «дихотомической» классификаций (см. рисунок 2) получены в разных программных средствах ГИС с помощью разного инструментария. Сети вариантов «связанной» классификации строятся на едином полилинейном слое, различаясь лишь классификационными индексами в таблице атрибутов, что позволяет выполнять их строгое и точное сопоставление. Напротив, две сети вариантов «дихотомической» классификации строились независимо и существенно отличаются по локализации и топологии как друг от друга, так и от сетей «связанной» классификации в целом. Пространственное сравнение таких сложных объектов представляет собой нерешенную пока задачу. Поэтому для сопоставления с участием вариантов сетей «дихотомической» классификации была разработана процедура обработки растровых представлений сетей, дающая лишь приблизительные результаты, позволяющие оценить линейные меры совпадения сетей с точностью, по оценке, примерно 5 %. Они приводятся в скобках и с пониженной точностью.

Данные таблицы 3 показывают, что особенности соотношений «связанных» вариантов классификации, описанные выше на примере бассейна Шахе, полностью сохраняются и для остальных исследуемых водосборов. Главные из них – высокая степень совпадения (~80 %) классификации Философова с вариантами по полному пути и по старшему «триплету», и почти 100 % совпадение двух последних вариантов. Учитывая эту вторую особенность, в дальнейшем анализе будем рассматривать только вариант классификации по старшему «триплету».

Напротив, все соотношения между вариантами водораздельных сетей «связанных» классификаций и вариантами «дихотомических» классификаций показывают очень низкий уровень их совпадения – в интервале 20–30 %. Очевидно, такая низкая степень сходства указывает на отображение всеми вариантами самых общих закономерностей строения рельефа, но расхождения между двумя группами вариантов водораздельных сетей явно преобладают. Это же подтверждается и графическими представлениями сетей на примере бассейна р. Шахе (см. рисунок 2). Напротив, между вариантами сетей по инвертированному рельефу и по показателю Bmax наблюдается высокий уровень совпадения – на уровне 70 %. Таким образом, классификация сети водоразделов, основанная на её связи с речной сетью, и независимая от речной сети классификация водоразделов, представляют собой принципиально различные подходы, направленные на решение разных задач и дающие очень слабо сопоставимые результаты.

Как упоминалось, в результате порядковой классификации водоразделов ожидается возможность выявления порядковых закономерностей значений их морфометрических характеристик, аналогичных порядковым закономерностям характеристик водотоков. Поскольку вопрос к настоящему моменту концептуально не разработан, в данной работе возможно только продемонстрировать некоторые перспективы данного направления исследований.

Очевидным первым шагом может стать обобщение высотных характеристик водоразделов, поскольку это основная и наиболее доступная для массовой обработки характеристика рельефа.

Таблица 3. Соотношение различных вариантов выделения и классификации водоразделов по протяженности сети водоразделов

Table 3. Correlation of different watershed delineation and classification variants by network length

Параметр	**Бассейн Туапсе**		**Бассейн Шахе**		**Бассейн Мзымта**	
Суммарная протяженность сети водоразделов по классификации:	**км**	**%**	**км**	**%**	**км**	**%**
«связанная» В. П. Философова	692,8	100	1389	100	2160	100
по полному пути	622,8	89,9	1241	89,3	1893	87,6
по старшему триплету	622,8	89,9	1241	89,4	1896	87,8
по инвертированному рельефу	489	71	642	46	1010	47
по показателю B_{max}	501	72	670	48	1070	50
Суммарная протяженность сети водоразделов совпадающих порядков по классификациям (сеть 1 / сеть 2):	км	%	км	%	км	%
В. П.Философова/полного пути	551,6	79,6	1111	80,0	1707	79,0
В. П.Философова /старшего триплета	554,4	80,0	1113	80,1	1712	79,3
Полного пути/старшего триплета	620,0	99,6	1240	99,9	1892	99,8
В. П.Философова /инверт. рельеф	(186)*	(27)	(273)	(20)	(422)	(20)
В. П.Философова / B_{max}	(196)	(28)	(311)	(22)	(389)	(18)
Полный путь/инверт. рельеф	(191)	(31)	(276)	(22)	(420)	(22)
Полный путь / B_{max}	(174)	(28)	(292)	(24)	(382)	(20)
Старший триплет /инверт. рельеф	(192)	(31)	(278)	(22)	(420)	(22)
Старший триплет/ B_{max}	(176)	(28)	(291)	(24)	(382)	(20)
Инвертированный рельеф / B_{max}	(382)	(76)	(441)	(66)	(750)	(70)

* – данные пониженной точности. Сети водоразделов связанных и дихотомических сетей не полностью идентичны геометрически. При сравнении любой связанной и дихотомической или двух дихотомических между собой – длины водораздельных линий не одинаковы. В скобках в таблице показаны длины фрагментов сети 1, имеющие в пределах буфера ±100 м однопорядковые фрагменты водоразделов сети 2. Зеркальная процедура (сравнение сети 2 с сетью 1) – не полностью идентична, отклонение расчетных показателей в среднем составляет 4–5 % от длины сети 1.

Рисунок 3 демонстрирует закономерности изменения статистических параметров высот водоразделов разного порядка для трех исследуемых бассейнов по вариантам классификации: по В. П. Философову, по старшему «триплету», по инвертированному рельефу и по *Bmax*. Для каждого бассейна по каждому варианту классификации вычислялись минимальные и средние значения, а также среднеквадратические отклонения, высоты водоразделов каждого порядка. Способность таких закономерностей зафиксировать отчетливые морфометрические различия между порядками водоразделов обусловлено монотонным характером и большим диапазоном изменения минимальной и средней высоты по порядкам, а также низкими величинами среднеквадратического отклонения высот по порядкам.

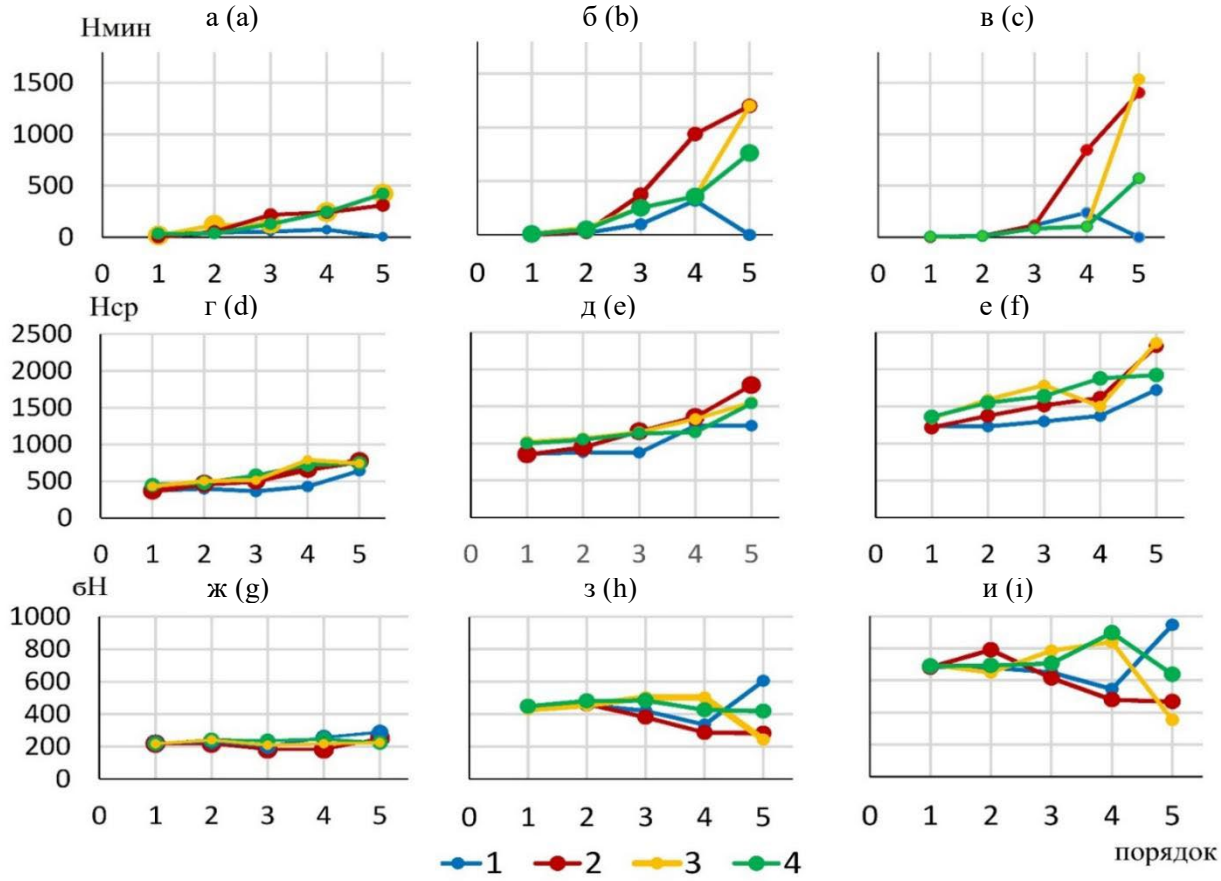


Рисунок 3. Порядковые закономерности для высотных характеристик водоразделов, минимального и среднего значения, а также среднеквадратического отклонения, соответственно, для бассейнов: а, г, ж – р. Туапсе; б, д, з – р. Шахе; в, е, и – реки Мзымта. Для каждого бассейна построение и классификация сети водоразделов выполнялось по методам: 1 – В. П. Философова; 2 – по старшему «триплету»; 3 – по инвертированному рельефу; 4 – по *Bmax*

Figure 3. Ordinal patterns for watershed elevation characteristics (minimum, average, and standard deviation, respectively) for the following basins: a, d, g – Tuapse River; b, e, h – Shakhe River; c, f, i – Mzymta River. For each basin, the construction and classification of the watershed network were performed using the following methods (see legend): 1 – V. P. Filosofov; 2 – highest "triplet"; 3 – inverted relief; 4 – *Bmax* index

Из рисунка 3 видим, что авторская классификация по «триплетам» старшего порядка дает в этом смысле наилучшие результаты. Зависимости минимальных и средних высот водоразделов от порядка для нее всегда монотонны и имеют чаще всего максимальный диапазон. Значения среднеквадратических отклонений высоты по порядкам для данного варианта чаще всего наименьшие. Классификация по *Bmax* также демонстрирует монотонность и значительные диапазоны зависимостей. Зависимости для классификаций по В. П. Философову и инвертированному рельефу часто не монотонны и их диапазоны меньше. Подчеркнем, что эти данные подтверждают лишь принципиальную возможность обобщения морфометрических характеристик водоразделов в виде порядковых закономерностей, а также показывают, что применение классификаций, лучше обоснованных физически, дает лучшие свойства этих закономерностей.

Выводы

Приведенные выше результаты анализа методов выделения и порядковой классификации водоразделов показывают, что существует два подхода к проблеме. Первый основан на представлении о целостной системе структурных линий рельефа, в рамках которой сети водотоков (тальвегов) и водоразделов рассматриваются как

одноранговые, тесно взаимосвязанные и топологически подобные. Наиболее известной разработкой в этом направлении является метод морфометрического анализа В. П. Философова, включающий «связанную» классификацию водоразделов на основе базовой классификации речной сети Хортона-Стралера. Метод не только продемонстрировал значительную эффективность как инструмент решения задач геологии и геоморфологии, но и имеет существенный потенциал методического и технологического развития на базе современных ЦМР и ГИС.

Второй подход не имеет столь же развитого теоретического обоснования, как первый, и основан скорее на интуитивных представлениях геоморфологов о водоразделах как основном каркасе рельефа [26], и о необходимости различать водоразделы по их значимости либо выраженности. В его рамках выделение на карте водораздельной сети в виде древовидного графа естественно приводит к аналогии с речной сетью и к попыткам прямо применить к водоразделам схему нисходящей порядковой классификации. При этом полученная порядковая классификация водоразделов будет слабо связана, либо совсем не связана, с порядковой классификацией водотоков того же бассейна.

Важнейшим, упомянутым выше, недостатком второго подхода представляется неосновательный перенос концептуальной основы порядковой классификации с водотоков на водоразделы. Сходство плановых форм ветвящихся сетей не должно затушевывать принципиальное различие физических процессов, формирующих водотоки и водоразделы. В крайнем своем виде указанное противоречие проявляется для часто используемого приема построения водораздельных сетей путем построения речной сети инструментами ГИС на обращенном рельефе (инвертированной ЦМР). Разобранные выше недостатки этого приема ставят под сомнение целесообразность его использования в качестве метода геоморфологического исследования.

Более убедительно выглядит методика выделения водоразделов на основе континуального показателя значимости Bmax, имеющего ясный физический смысл и корректный алгоритм определения. Однако его применение для выделения сетей водоразделов не требует затем применения «дихотомической» порядковой классификации – в случае необходимости переход к дискретным порядкам водоразделов можно осуществить разного рода интервальными обобщениями и т.п. Можно заключить, что развитие классификаций водоразделов независимо от водотоков может быть способом решения специальных задач геоморфологии, но применение в них дискретных порядков требует самостоятельного обоснования.

Для решения задач гидрологии и междисциплинарных перспективна разработка единой порядковой классификации главных структурных линий рельефа бассейна, в рамках которой классификация водоразделов должна быть «отражением» классификации водотоков, т.е. быть «связанной», по терминологии В.П. Философова. Дополнение классификации Философова принципом анализа путей добегания дает ряд существенно лучших свойств получаемых сетей водоразделов: более рациональный общий вид и размещение в пределах бассейнов; решение проблемы пересечения линиями водоразделов высоких порядков речных долин и водотоков; существенно лучшие классифицирующие свойства порядков с перспективой получения порядковых закономерностей морфометрических характеристик водоразделов, аналогичных «законам Хортона».

Преимущества предлагаемого метода существенно расширяют возможности морфологического анализа рельефа на концептуальной основе, предложенной В. П. Философовым. Они также открывают значительные перспективы в развитии классификации речных систем, методов индикационного оценивания гидрологических характеристик, решении задачи параметризации современных пространственно-распределенных моделей стока.

Благодарности

Методический обзор и разработка инструментов автоматизированной обработки ЦМР выполнены в рамках темы № FMWZ-2025-

0001 Государственного задания ИВП РАН (№ госрегистрации 125031403712-5). Обработка и анализ рельефа трех тестовых бассейнов выполнены в рамках темы Государственного задания Института природно-технических систем (№ госрегистрации 124013000609-2). Геоморфологическая интерпретация результатов выполнялась в рамках темы Государственного задания кафедры геоморфологии и палеогеографии МГУ имени М. В. Ломоносова (№ I.2).

Acknowledgements

The methodological review and the development of automated DEM processing tools were conducted within the framework of Research Topic No. FMWZ-2025-0001 under the State Assignment of the Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences (State Registration No. 125031403712-5). The processing and relief analysis of the three test basins were carried out as part of the State Assignment of the Institute of Natural and Technical Systems (State Registration No. 124013000609-2). The geomorphological interpretation of the results was realized within the framework of the State Assignment of the Department of Geomorphology and Paleogeography of the Lomonosov Moscow State University (No. I.2).

Литература / References

1. Хортон Р. Е. Эрозионное развитие рек и водосборных бассейнов [Текст]: Гидрофиз. подход количеств. морфологии. Москва: Гос. изд-во иностр. лит., 1948. 159 с.
2. Гарцман И. Н. Топология речных систем и гидрографические индикационные исследования // Вод. ресурсы, 1973. №3. С 109–124.
3. Карасев М. С., Худяков Г. И. Речные системы (на примере Дальнего Востока). М.: Наука, 1984. 143 с.
4. Корытный Л. М. Бассейновая концепция в природопользовании. Иркутск: Ин-т геогр. СО РАН, 2001. 163 с.
5. Rodriguez-Iturbe I., Rinaldo A. Fractal river basins: chance and self-organization. Cambridge University Press, 1997. 547 p.
6. Философов В. П. Основы морфометрического метода поисков тектонических структур. Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1975. 232 с.
7. Философов В. П. Краткое руководство по морфометрическому методу поисков тектонических структур. Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1960. 94 с.
8. Гарцман Б. И., Шекман Е. А., Ли К. Т. Порядковая классификация речных водоразделов на основе обработки цифровых моделей рельефа // География и природ. ресурсы. 2016. № 4. С. 164–173.
9. Гарцман Б. И., Энтин А. Л., Шекман Е. А. Специальные инструменты структурно-гидрографического анализа речных систем в среде ArcMap // Водные ресурсы. 2024. Т. 51. № 3. С. 244-261.
10. Guilbert E., Lessard F., Perreault N., Jutras S. Surface network and drainage network: towards a common data structure. Journal of Spatial Information Science, 2023, vol. 26, pp. 53–77. DOI:10.5311/JOSIS.2023.26.240.
11. Cayley A. On contour and slope lines. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 1859, s. 4, vol. 18 (120), pp. 264–268. DOI:10.1080/14786445908642760.
12. Ласточкин А. Н. Общая теория геосистем. СПб.: Лема, 2011. 980 с.
13. Werner C. Explorations into the formal-structure of drainage basin. Earth Surface Processes and Landforms, 1994, vol. 19, iss. 8, pp. 747–762. DOI:10.1029/wr018i004p00997.

14. Werner C. Formal analysis of ridge and channel patterns in maturely eroded terrain. Annals of the Association of American Geomorphology, 1988, vol. 78, iss. 2, pp. 253–270. DOI:10.1111/j.1467-8306.1988.tb00206.x.

15. Werner C. Several duality theorems for interlocking ridge and channel networks. Water Res. Res., 1991, vol. 27, iss. 12, pp. 3237–3247. DOI:10.1029/91WR02322.

16. Философов В. П. Карты изобазит и остаточного рельефа. В кн.: Применение геоморфологических методов в структурно-геологических исследованиях. М.: «Недра», 1970. С. 43–52.

17. Морфометрический метод при геологических исследованиях / Под ред. Корженевского А. А., Философова В. П. Материалы первого межведомственного совещания по морфометрическому методу поисков тектонических структур, состоявшегося в Саратове с 1 по 4 февраля 1961 г. Саратов: Изд-во Сар. ун-та, 1963. 264 с.

18. Симонов Ю. Г. Объяснительная морфометрия рельефа. М.: ГЕОС, 1999. 250 с.

19. Якименко Э. Л. Карты вершинной и базисной поверхностей Сибири и Дальнего Востока. Геоморфология. 1984. № 3. С. 95–100.

20. Копылов И. С. Морфонеотектоническая система оценки геодинамической активности. Пермь: ПГНИУ, 2019. 130 с.

21. Симонов Д. А., Захаров В. С., Гильманова Г. З., Диденко А. Н. Новейшие вертикальные движения Южного Сихотэ-Алиня и характеристики самоподобия гидросети региона. Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2020. № (3). С. 25–36.

22. McKenzie N. J., Ryan P. J. Spatial prediction of soil properties using environmental correlation. Geoderma, 1999, vol. 89, iss. 1–2, pp. 67–94. DOI:10.1016/s0016-7061(98)00137-2.

23. Флоринский И. В. Теория и приложения математико-картографического моделирования рельефа // Дис. … д.т.н. Пущино: ИМПБ РАН, 2010. 267 с.

24. Lindsay J., Seibert J. Measuring the significance of a divide to local drainage patterns. International Journal of Geographical Information Science, 2013, vol. 27. DOI:10.1080/13658816.2012.705289.

25. Hawker L., Uhe P., Paulo L., Sosa J., Savage J., Sampson C., Neal J. A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed. Environmental Research Letters, 2022, vol. 17, iss. 2, p. 024016. DOI: 10.1088/1748-9326/ac4d4f.

26. Гаврилов А. А. Некоторые особенности соотношений орографических элементов и гидросети // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2020. № 6. С. 99–109.

Поступила в редакцию / Received 22.02.2026
Принята к публикации / Accepted 19.05.2026

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гарцман Борис Ильич, доктор географических наук, главный научный сотрудник, Институт водных проблем РАН, г. Москва, Россия, Институт инженерно-технических систем, г. Севастополь, Россия; SPIN-код: 7792-9120, ORCID: 0000-0002-5876-7015; e-mail: gartsman@inbox.ru.

Харченко Сергей Владимирович, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, МГУ имени М. В. Ломоносова; старший научный сотрудник, Институт географии РАН, Москва, Россия; ORCID: 0000-0002-2823-5747, WoS ResearcherID: N-1134-2016, IstinaResearcherID (IRID): 994605, AuthorID: 56116998300; e-mail: xar4enkkoff@yandex.ru.

Энтин Андрей Львович, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, МГУ имени М. В. Ломоносова; научный сотрудник, Институт водных проблем РАН, г. Москва, Россия; SPIN-код: 2012-3433; AuthorID: 918625; WoS ResearcherID: V-3775-2017; Scopus Author ID: 57202589652, ORCID: 0000-0002-0350-5587; e-mail: aentin@geogr.msu.ru.

Толкачева Василиса Федоровна, инженер, Институт водных проблем РАН, г. Москва, Россия; SPIN-код: 7337-0841, AuthorID: 1116285, ORCID: 0009-0009-5093-6476, WoS ResearcherID: JOK-0533-2023; e-mail: vasilisa.tolkachevag@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Boris I. Gartsman, D. Sc. (Geography), Associate Professor, Chief Researcher, Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; Institute of Natural and Technical Systems, Sevastopol, Russia; SPIN:7792-9120, ORCID: 0000-0002-5876-7015; email: gartsman@inbox.ru.

Sergey V. Kharchenko, Ph. D. (Geography), senior researcher, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; researcher, Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; ORCID: 0000-0002-2823-5747, WoS ResearcherID: N-1134-2016, IstinaResearcherID (IRID): 994605, AuthorID: 56116998300; e-mail: xar4enkkoff@yandex.ru.

Andrey L. Entin, Ph. D. (Geography), senior researcher, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; researcher, Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; SPIN-code: 2012-3433; AuthorID: 918625; WoS ResearcherID: V-3775-2017; Scopus Author ID: 57202589652, ORCID: 0000-0002-0350-5587; e-mail: aentin@geogr.msu.ru.

Vasilisa F. Tolkacheva, engineer, Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; SPIN-code: 7337-0841, AuthorID: 1116285, ORCID: 0009-0009-5093-6476, WoS ResearcherID: JOK-0533-2023; e-mail: vasilisa.tolkachevag@yandex.ru.

Научная статья / Scientific paper
УДК: 556.013:004.942
DOI: 10.34753/HS.2026.8.1.27

Концептуальные гидрологические модели HBV и GR4J: современные средства реализации и примеры использования

А. М. Мирошниченко, К. И. Головнин
Институт водных проблем РАН, г. Москва, Россия
e-mail: anton199823@gmail.com, golovnin98@bk.ru

Аннотация. Концептуальные модели формирования речного стока широко применяются в задачах гидрологии суши по ряду причин. Прежде всего, такие модели основаны, как правило, на полуэмпирических зависимостях, упрощенно описывающих основные процессы на водосборе, включают небольшой набор калибруемых параметров и не требуют большого числа входных переменных. Вычислительная простота, толерантность к данным и появление в последние десятилетия культуры свободного обмена программными кодами значительно способствовали распространению концептуальных моделей, многие из них реализованы на широко используемых в научной среде языках программирования R и Python. Большинство таких моделей имеют открытый исходный код, справочную документацию, встроенные функции калибровки и оценки качества, а также средства визуализации. Целью данной работы является иллюстрация возможности использования подобных современных программных реализаций концептуальных моделей, которые могут быть в дальнейшем использованы для краткосрочного прогноза речного стока, восстановления стока за исторический период или изменения стока под воздействием климатических факторов. В качестве эксперимента был проведён обзор двух современных реализаций концептуальных моделей HBV и GR4J на языках Python и R для моделирования стока. На примере рек России и Казахстана показан процесс создания модели формирования стока с речного водосбора на основании открытых данных и свободно распространяемых программных библиотек, проведена оценка возможностей и ограничений применения современных реализаций моделей.

Ключевые слова: концептуальное моделирование; формирование речного стока; калибровка моделей; HBV; GR4J; программные средства гидрологического моделирования.
Для цитирования: Мирошниченко А. М., Головнин К. И. Концептуальные гидрологические модели HBV и GR4J: современные средства реализации и примеры использования // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2026. Т. 8. Вып. 1. С.27–46. DOI: 10.34753/HS.2026.8.1.27.

Conceptual Hydrological Models HBV and GR4J: Modern Implementation Tools and Examples of Application

Anton M. Miroshnichenko, Kirill I. Golovnin
Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
e-mail: anton199823@gmail.com, golovnin98@bk.ru

Abstract. Conceptual models of river runoff formation are widely used in land hydrology for several reasons. First, such models are typically based on semi-empirical relationships that provide a simplified representation of key processes within a catchment, include a limited set of calibrated parameters, and do not require a large number of input variables. Their computational efficiency, tolerance to data limitations, and the growing culture of open-source code sharing in recent decades have significantly contributed to their widespread adoption. Many of these models are implemented in commonly used scientific programming languages such as R and Python. Most implementations are open-source, well-documented, and provide built-in tools for calibration, performance evaluation, and visualization.

The aim of this study is to demonstrate the applicability of modern software implementations of conceptual hydrological models, which can be further used for short-term streamflow forecasting, reconstruction of historical runoff, and assessment of runoff changes under climate impacts. As part of the study, two contemporary

implementations of the HBV and GR4J conceptual models in Python and R were reviewed. Using case studies of rivers in Russia and Kazakhstan, the process of developing a catchment-scale runoff model based on open data and freely available software libraries is demonstrated. The results are used to assess the capabilities and limitations of these modern model implementations.

Keywords: conceptual modeling; river runoff formation; model calibration; HBV; GR4J; hydrological modeling software.

For citation: Miroshnichenko A.M., Golovnin K.I. Conceptual Hydrological Models HBV and GR4J: Modern Implementation Tools and Examples of Application. Hydrosphere. Hazard processes and phenomena, 2026, vol. 8, iss. 1, pp. 27–46. DOI: 10.34753/HS. 2026.8.1.27. (In Russian; abstract in English).

Введение

Исследование процессов формирования речного стока является классической задачей гидрологии суши, решение которой направлено на углубление понимания этих процессов для моделирования отклика речных водосборов на внешние воздействия и прогнозирования будущих состояний речных систем. Для наиболее точного воспроизведения этих процессов необходимы детальные физико-математические модели, сбор многокомпонентной исходной информации для которых требует больших затрат и редко реализуем на практике. Вычисления с использованием таких моделей также занимают продолжительное время, что не всегда отвечает требованиям оперативности, например, при выпуске краткосрочного прогноза. Одним из современных подходов к решению задач описания и прогноза состояния речных систем, объединяющих представления о формировании речного стока, являются концептуальные модели, которые предлагают упрощенное, но эффективное представление об определяющих его процессах [1]. Такие модели стали своеобразным «стандартом отрасли» и несколько десятилетий применяются во многих научно-прикладных задачах [2–4].

В процессе своего развития гидрологические исследования традиционно опирались на данные инструментальных наблюдений, полевые и лабораторные исследования речных водосборов, что позволяло разрабатывать представления о процессах формирования стока и создавать на их основе математические модели. Для формализации гидрологических моделей на всём протяжении исследований широко использовались методы математического анализа и вычислительного программирования. В последние десятилетия активное развитие языков программирования, вычислительных алгоритмов и систем управления данными интенсивно проникает и в эту область, открывая новые возможности для более глубокого и комплексного изучения процессов формирования стока в речных водосборах. Эта трансформация, также называемая цифровизацией, способствует постоянному совершенствованию вычислительных методов и открывает всё новые возможности для понимания, исследования и управления водными ресурсами.

Концептуальные гидрологические модели основаны на априорных представлениях о совокупности процессов гидрологического цикла на водосборе, описанных, как правило, эмпирическими или полуэмпирическими зависимостями, параметры которых определяются в ходе оптимизации. Несмотря на меньшую детализацию в описании процессов формирования стока в сравнении с физически обоснованными моделями, концептуальные модели получили широкое распространение в практике анализа и прогноза поведения речных систем [1].

Развитие информационных технологий за последние пять десятилетий привело к появлению большого числа моделей процессов гидрологического цикла суши. Физико-математические модели содержат детальные физически обоснованные представления описываемых процессов формирования речного стока с учетом их пространственной неоднородности, тогда как концептуальные модели интегрируют эти процессы в пределах речного водосбора. Перечень используемых в настоящее время в гидрологии суши и смежных дисциплинах моделей, доступных к скачиванию и

с открытым исходным кодом, собран на сайте гидрологической секции сообщества моделирования динамики поверхностных систем и насчитывает в себе на момент публикации 115 моделей[1]. Существуют также перечни программных инструментов для гидрологических задач, реализованных на языке Python и R.

К числу типично концептуальных моделей относятся HBV и GR4J, которые рассматриваются в настоящей статье. Авторы стремились показать применимость этих моделей для территории СНГ. В связи с этим в качестве примера были использованы два водосбора, обеспеченных данными гидрометеорологических наблюдений, расположенных в Российской Федерации и Республике Казахстан.

Статья организована следующим образом: в первой части приводится обзор моделей HBV и GR4J, их структуры, необходимых входных данных и параметров оптимизации. Далее рассмотрены примеры работы с программными пакетами для их реализации на языках Python и R.

Обзор концептуальных моделей HBV и GR4J

О распространенности этих моделей в научной среде свидетельствует число публикаций на широко используемых ресурсах. С момента разработки моделей к настоящему времени число ежегодно публикуемых посвящённых им работ увеличилось в разы. Так, в базе ScienceDirect на период 1998–2003 гг. ежегодно приходится 1–2 статьи с упоминанием модели GR4J, то в последние годы (2023–2024 гг.) их количество превысило 50 в год. Модель HBV в 2001–2004 гг. упоминалась в 6–9 работах каждый год, в 2022–2025 гг. – от 93 до 123 раз в отдельные годы. За более чем 40 лет своего существования она была использована в более чем 1400 публикациях, применялась в 95 странах и использовалась почти в 50 докторских диссертациях [5]. Широкое распространение этих моделей во многом обусловлено доступностью программных средств, в том числе на простых в освоении и использовании языках, таких как Python и R [7].

В библиотеках airGR[2,3], airGRteaching[4] на языке R представлены все функции, необходимые для подготовки входных данных, создания модели для водосбора, калибровки параметров и дальнейших расчётов, анализа и визуализации результатов. Подобно основным пакетам языка, для всех функций имеется достаточно полная справочная документация, упрощающая их использование.

Библиотека LuMod[5] языка Python включает набор инструментов для использования концептуальных гидрологических моделей с сосредоточенными параметрами (lumped models). При разработке LuMod был сделан акцент на удобство в использовании для исследовательских и учебных задач.

Широкому распространению указанных моделей способствовало включение их программных реализаций (кода) в установщики пакетов для языков Python (pip и conda) и R (Comprehensive R Archive Network, CRAN). Следует отметить, что необходимым условием включения является наличие разработанной документации, что несомненно повышает применимость программного кода конечными пользователями.

Далее приведены описания структуры моделей, а также примеры использования библиотек на Python и R для моделирования временных рядов речного стока рек Вельва в бассейне верхней Камы (РФ) и Буктырма в бассейне Черного Иртыша (РК).

[1] CSDMS contributors. Hydrological Models. [Электронный ресурс]. URL: https://csdms.colorado.edu/wiki/Hydrological_Models (дата обращения: 01.11.2025).

[2] AirGR: Hydrological modelling tools developed at IRSTEA [Электронный ресурс]. URL: https://gitlab.irstea.fr/HYCAR-Hydro/airgr (дата обращения: 01.11.2025).

[3] CRAN: Contributed Packages / L. Coron, O. Delaigue, G. Thirel [и др.], 2017a. DOI:10.32614/CRAN.package.airGR.

[4] CRAN: Contributed Packages / O. Delaigue, L. Coron, P. Brigode, G. Thirel, 2018. DOI:10.32614/CRAN.package.airGRteaching.

[5] Esparza S. A. LuMod: Conceptual hydrological models in Python [Электронный ресурс]. URL: https://zaul_ae.gitlab.io/lumod-docs/ (дата обращения: 01.11.2025).

Модель HBV

Модель HBV (Hydrologiska Byrå Vattenbalansavdelning) является одной из наиболее широко используемых концептуальных гидрологических моделей. HBV относится к моделям с сосредоточенными (едиными для всего водосбора) параметрами, однако возможно разделение моделируемого водосбора, например, для учёта высотного градиента температур и осадков [5]. Набор минимально необходимой информации для расчёта стока при помощи HBV включает ряды значений температуры воздуха, суммарных испаряемости и осадков, а также значение площади водосбора. Временной шаг равен, как правило, одним суткам, но возможно также моделирование с другими интервалами.

Модель HBV состоит из трех основных расчетных блоков:

- блок описания динамики снежного покрова;
- блок учета влажности почвы;
- блок расчёта единичного гидрографа и руслового стока.

В связи с наличием изначально открытого кода для модели был разработаны ряд дополнительный модулей, как например, для моделирования стока в регионах с распространением многолетнемёрзлых пород, блок транспорта наносов [7], распространения примесей [8] и т.п. В базовой реализации модель имеет набор основных параметров уравнений, описывающих различные процессы, такие как инфильтрация, испарение, таяние снега и др. (таблица 1). Эти параметры используются при калибровке модели с учётом их допустимых диапазонов.

Таблица 1. Параметры модели HBV, реализованной в библиотеке LuMod
Table 1. Parameters of the HBV model implemented in the LuMod library

Параметр	Описание
maxbas	Время добегания (сут)
tthres	Пороговая температура для начала таяния снега (°C)
dd	Коэффициент стаивания (мм/°C·сут)
cevp	Параметр испаряемости (PET), зависящий от землепользования (мм/сут·°C)
cevpam	Амплитуда синусовой функции для PET (-)
cevpph	Фаза функции синуса для коррекции PET (сут)
beta	Коэффициент формы для гидрографа стока (-)
fc	Максимальная полевая влагоемкость почвы (мм)
pwp	Влажность завядания почвы в долях от fc (-) [0,1]
k0	Коэффициент поверхностного стока ($сут^{-1}$)
k1	Коэффициент межпластового стока ($сут^{-1}$)
k2	Коэффициент подземного стока ($сут^{-1}$)
lthres	Пороговый уровень воды для формирования поверхностного стока (мм)
snow0	Начальные запасы влаги в снежном покрове (мм)
s0	Начальный запас влаги в почве (s/fc) [0,1]
w01	Запас воды в верхнем почвенном резервуаре (мм)
w02	Запас воды в нижнем почвенном резервуаре (мм)

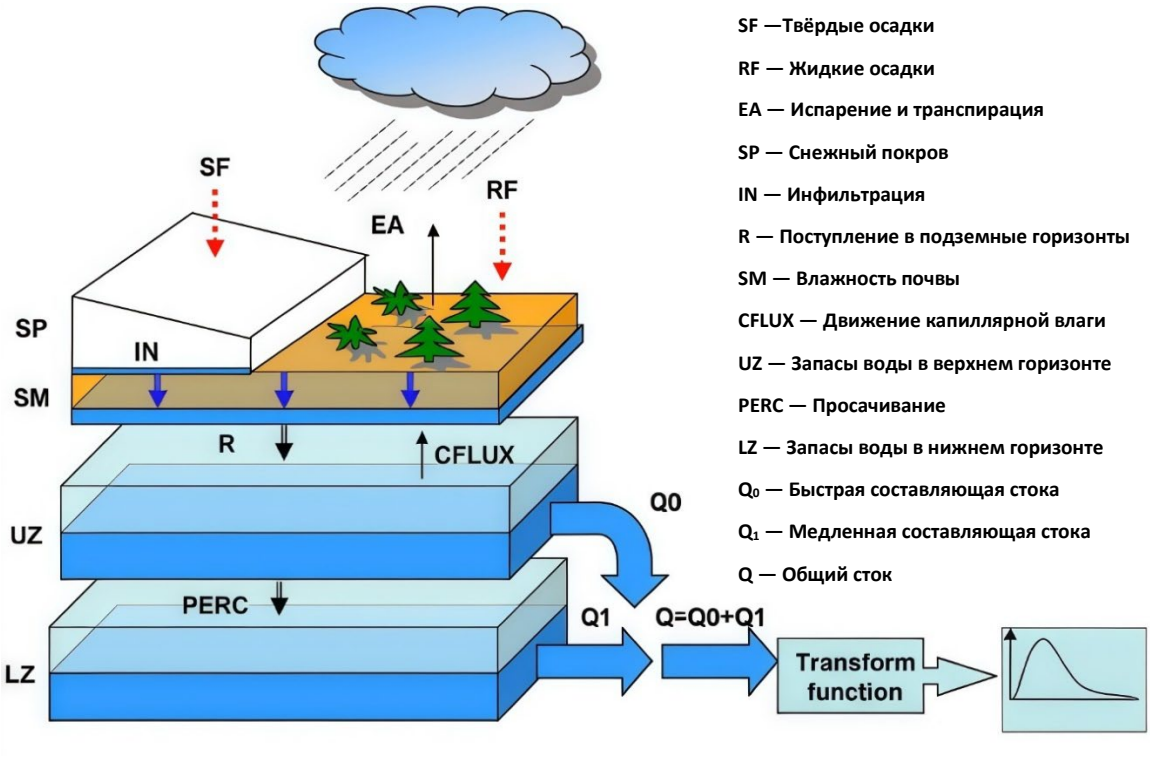


Рисунок 1. Схематическое описание модели HBV [11]
Figure 1. Schematic description of the HBV model [11]

Модель GR4J

Модель GR4J (Génie Rural à 4 paramètres journalier) также предназначена для описания дождевого стока на основе уравнений, содержащих 4 калибруемых параметра (таблица 2), что отражено в названии [10]. Как и для HBV, используются ряды средних значений температуры воздуха, суммарных испаряемости и осадков (рисунок 2), испаряемость может быть рассчитана исходя из среднесуточной температуры и широты водосбора [11]. Расчетный шаг модели составляет одни сутки (что следует из названия). Для учёта накопления и таяния снега на водосборе GR4j обычно применяется совместно с моделью динамики снежного покрова CemaNeige (таблица 2, рисунок 2).

Данная модель успешно применялась к различным водосборам в России [12], Франции, Словении и Австралии [13] для оценки воздействия на речные экосистемы, прогнозы многолетних изменений речного стока в Марокко [14], для краткосрочного прогноза паводков [15].

Таблица 2. Описание параметров GR4J и CemaNeige
Table 2. Description of the GR4J and CemaNeige parameters

Параметр	Описание
Речной сток (GR4J)	
X1	Ёмкость формирования стока (мм)
X2	Коэффициент водообмена (с грунтовыми водами, мм)
X3	Ёмкость трансформации стока (мм)
X4	Время бассейнового добегания (сутки)
Динамика снежного покрова (CemaNeige)	
cT	Коэффициент инерционности показателя температуры снежного покрова
Kf	Коэффициент стаивания (мм/(сутки*°C))

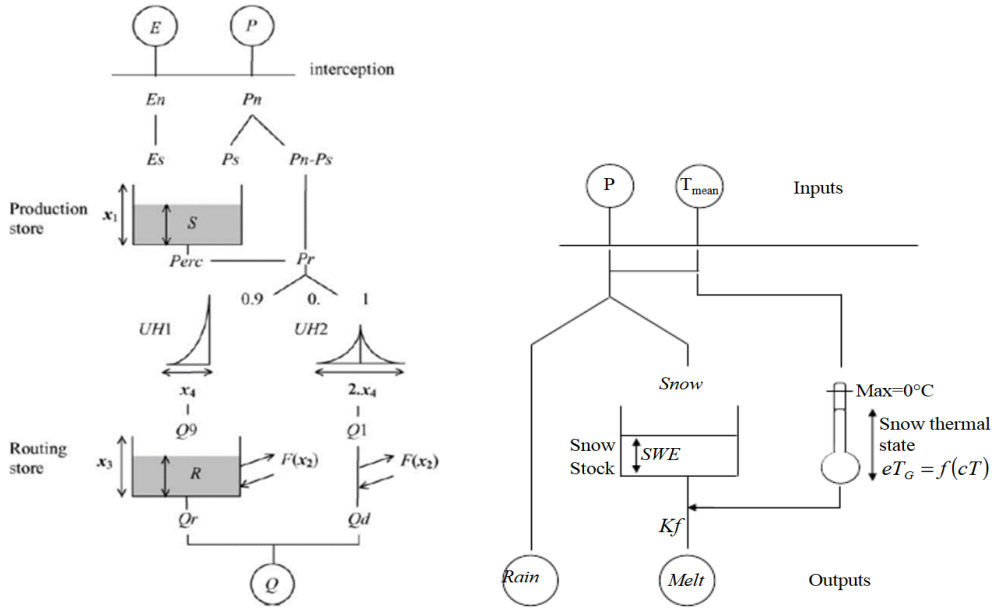


Рисунок 2. Схематическое представление модели GR4J (слева) и CemaNeige (Справа) [16]
Figure 2. Schematic representation of the GR4J (left) and CemaNeige (right) models [16]

В модели CemaNeige также предусмотрен учёт изменения температур и осадков с высотой и, следовательно, отличных условий снегонакопления на высотных уровнях. Для этого водосбор может быть разделен на несколько равных по площади частей, соответствующих определённому диапазону высот. Для этого в модели может быть дополнительно добавлена гипсографическая кривая (распределение площади водосбора с высотой).

Также представленные данные требуют предварительной обработки для формирования временных рядов, в данном случае среднесуточных расходов воды. Подготовка возможна в любых табличных редакторах. Для дальнейшего использования в настоящей статье все данные о гидрометеорологических величинах были сведены в единую таблицу базы данных, которая готовится для каждой модели путем простых манипуляций, описанных ниже.

Методика исследования

Ниже рассматриваются основные знания и шаги, необходимые для моделирования стока. Особое значение при построении моделей имеет корректная подготовка входных данных и выбор подходящих методов оценки качества. Использование временных рядов метеорологических наблюдений и расходов воды позволяет сформировать непрерывную основу для калибровки и последующего тестирования моделей. При этом важно обеспечить согласованность данных по временным интервалам, а также учитывать возможные пропуски и погрешности измерений, которые могут влиять на устойчивость результатов моделирования.

Ключевым этапом моделирования является калибровка параметров, при которой достигается наилучшее соответствие между рассчитанными и наблюдаемыми значениями расходов воды. Для объективной оценки качества моделирования применяются количественные метрики NSE и KGE, позволяющие анализировать различные аспекты точности — от общей формы гидрографа до величины ошибок. Последующая валидация на независимом временном интервале обеспечивает проверку устойчивости моделей и их пригодности для практического использования в задачах прогнозирования.

Подготовка данных

Подготовка исходных данных идентична для обеих используемых моделей. Для сбора необходимых данных метеорологических наблюдений для территории России использовались информационные ресурсы Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации Федеральной службы по гидрометеорологии и

мониторингу окружающей среды Российской Федерации[6]. Данные в Автоматизированной информационной системе обработки режимной информации (АИСОРИ) изначально представлены в удобной для расчетов форме временных рядов, для многих метеостанций имеются достаточно полные архивы с начала регулярных наблюдений.

Данные о расходах воды получены из ГИС ЦП Вода[7]. На этом ресурсе размещены данные гидрологических наблюдений с 2008 года, поступающие в систему в течение, как правило, одного-двух лет. Доступные на этом ресурсе данные гидрологических наблюдений для большинства постов охватывают период с 2008 до календарного года, предшествующего моменту размещения.

Для сбора гидрологических и метеорологических данных по территории Казахстана был использован веб-сайт Национальной гидрометеорологической службы Республики Казахстан[8].

Зачастую для исследуемого водосбора сложно найти близко расположенную метеостанцию, данные для которой были бы репрезентативны для воспроизведения речного стока. Современным подходом в этом случае является использование атмосферного реанализа [12; 17] в данной работе были использованы данные глобального атмосферного реанализа ERA5 Land, выпускаемые Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) и доступные в системе Google Earth Engine [18]. Эти данные о среднесуточной температуре воздуха на высоте 2 м и суммарном слое осадков за сутки представлены в растровом формате с размером ячейки 0,1x0,1°. В настоящей работе для расчёта метеорологического воздействия на водосбор применялась процедура взвешенного осреднения значений метеовеличин с учётом как полностью, так и частично покрываемых контуром водосбора ячеек сетки реанализа. При использовании концептуальных моделей эта процедура обязательна, так как позволяет вычислить воздействие на водосбор в целом, а не точечно [19–20].

В качестве первого объекта исследования был выбран водосбор р. Вельва выше створа поста Ошиб (индекс 76147, площадь 836 км^2), расположенный в правобережной части бассейна верхней Камы, в природной зоне тайги, на территории Пермского края. Средняя высота водосбора составляет 186 м. Режим реки Вельва относится к восточно-европейскому типу с максимальным стоком во время весеннего снеготаяния, однако в летний период возможны дождевые паводки, когда расходы сопоставимы с периодом весеннего половодья. В связи с высокой интенсивностью такие паводки могут приводить к опасным и неблагоприятным последствиям, для предупреждения которых требуется методика оперативного прогноза на основе модели формирования стока. Сток реки не зарегулирован, антропогенное воздействие на водосбор небольшое, главной отраслью хозяйственной деятельности является лесозаготовка.

Ближайшей к исследуемому водосбору является метеостанция Кудымкар (индекс 28116). Следующие в порядке удаления пункты наблюдательной сети расположены на значительно большем расстоянии и использование данных с них для расчёта метеорологического воздействия на водосбор не является целесообразным. Схема расположения водосбора и пунктов наблюдений представлена на рисунок 3.

[6] Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации (ВНИИГМИ-МЦД) [Электронный ресурс]. — URL: https://meteo.ru/ (дата обращения: 01.11.2025).
[7] ГИС ЦП Вода [Электронный ресурс]. — URL: https://gis.favr.ru/personal-account (дата обращения: 01.11.2025).
[8] РГП «КАЗГИДРОМЕТ» [Электронный ресурс]. URL: www.kazhydromet.kz (дата обращения: 20.04.2026)

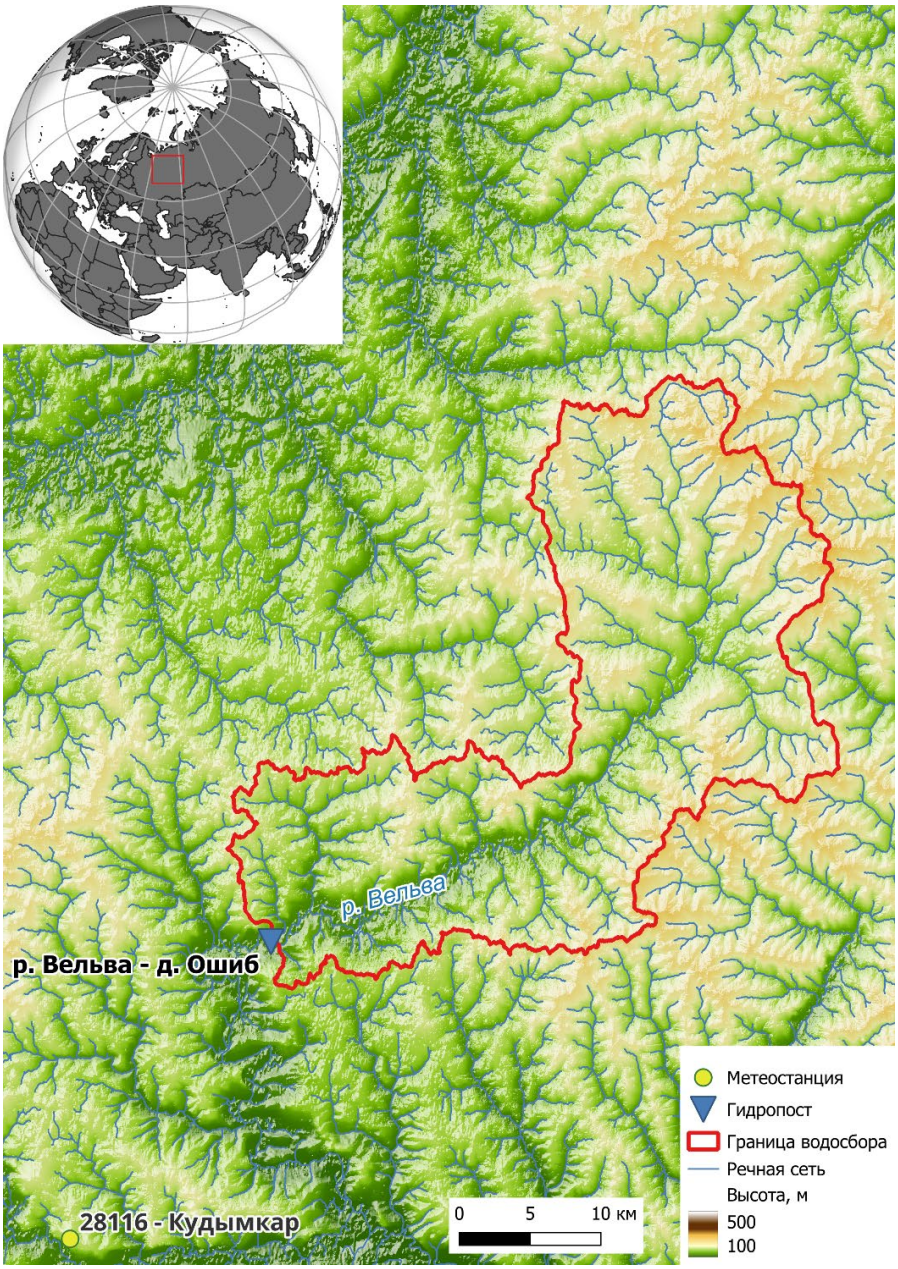


Рисунок 3. Расположение водосбора поста р. Вельва – д. Ошиб и ближайшей метеостанции (Кудымкар)
Figure 3. Location of the Velva River – Oshib village catchment and the nearest meteorological station (Kudymkar)

Вторым исследуемым объектом послужил водосбор реки Буктырма выше поста Берель (индекс 11124), расположенный в Восточно-Казахстанской области Республики Казахстан. Буктырма является правым притоком Иртыша в его верхнем течении. Площадь водосбора р. Буктырмы выше створа составляет 1937 км^2 (что примерно в 2,5 раза больше, чем для первого объекта). Водосбор расположен в среднегорной местности западного Алтая, средняя высота водосбора составляет 2232 м. Буктырма в данном пункте имеет режим горной реки: начало половодья приходится в среднем на апрель, максимальные расходы – на конец мая-начало июня. Спад половодья продолжительный, осложняемый дождевыми паводками, межень устанавливается в ноябре, что можно видеть на рисунках 9, 10, 13, 14. Ближайшим к центру водосбора пунктом метеорологических наблюдений является метеостанция Маркакольского заповедника (индекс 4888600), расположенная на удалении около 80 км (рисунок 4).

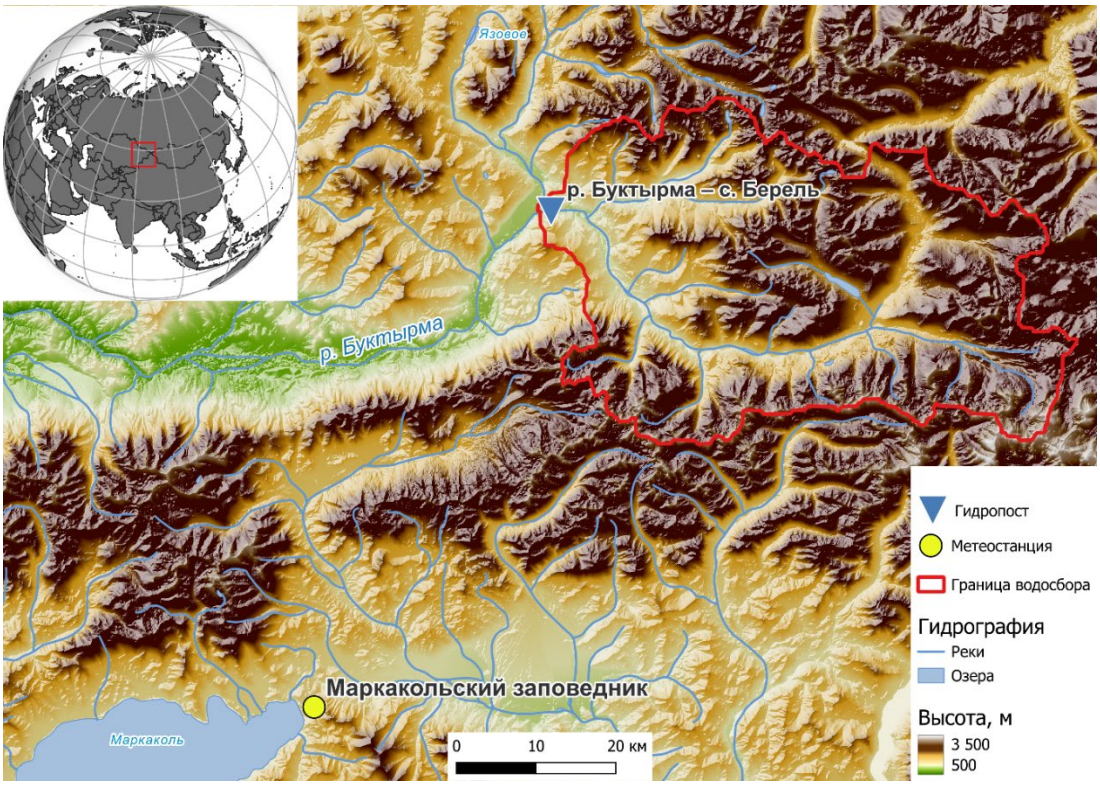


Рисунок 4. Расположение водосбора поста р. Буктырма – с. Берель и ближайшей метеостанции (Маркакольский заповедник)

Figure 4. Location of the Bukhtarma River – Berel village catchment and the nearest meteorological station (Markakol Nature Reserve)

Необходимые для моделирования суточного речного стока данные наблюдений включают регулярные временные ряды значений осадков и температур, измеренных или средних (суммарных) за временной интервал, соответствующий шагу моделирования стока (одни сутки). Данные об осадках и температурах имеются для каждой станции. Испаряемость может быть рассчитана исходя из известных значений температуры и широты водосбора; в данном случае применялся метод, предложенный в [11].

Калибровка и валидация

Важное значение при калибровке имеет выбор критерия оптимизации, периодов инициализации условий формирования стока («разогрева»), калибровки и валидации модели. В данном случае критерием оптимизации является коэффициент Нэша-Сатклиффа (NSE), для «разогрева» был отведён первый год, калибровка осуществлялась для 2/3 из оставшихся лет, валидация производилась на последней трети периода.

Следовательно, для калибровки реки Вельва использовался промежуток с 2009 по 2016 годы, валидация – с 2017 по 2020 годы, и период калибровки с 2007 по 2016 годы с валидацией на промежутке с 2017 по 2021 годы для реки Буктырма. Как показывает рисунок 7, период калибровки является достаточно репрезентативным: включает годы с высокими (2016) и низкими (2011) весенними половодьями, в 2015 и 2017 годах наблюдались высокие паводки во время летне-осенней межени.

После завершения калибровки сохраняются наилучшие параметры модели, соответствующие максимальному значению выбранного критерия оптимизации. Полученные параметры можно использовать для дальнейшего анализа и прогнозирования гидрологических характеристик. Они позволяют рассчитать значения стока с наименьшей ошибкой в рамках выбранной модели и заданных условий, а также обеспечивают основу для проведения сценарных расчетов и оценки чувствительности модели к изменениям входных данных.

Далее в статье приведен результат калибровки и валидации моделей HBV и GR4J для рек Вельва и Буктырма.

Моделирование с помощью библиотек LuMod и AirGr

В данном разделе рассматривается применение библиотеки LuMod[5] (реализация для модели HBV) и AirGr[2] для моделирования расходов воды. В качестве примера используется набор метеоданных о температуре, осадках и испаряемости, представленный в виде таблицы временных рядов.

Библиотека LuMod сопровождается открытой документацией, ориентированной на практическое использование моделей. Она содержит описание библиотеки, инструкции по установке и базовые примеры использования, демонстрирующие запуск моделей (HYMOD, HBV, GR4J и др.) и анализ полученных результатов. Кроме того, документация включает руководство к инструментам для оценки качества моделирования, калибровки параметров и анализа неопределенности, что позволяет использовать библиотеку как для научных исследований, так и для учебных задач гидрологического моделирования.

Для работы с обеими моделями необходимо располагать данными о площади моделируемого водосбора, для автоматического пересчета величины речного стока из $м^3/с$ в мм слоя. Так же, при отсутствии данных о испаряемости потребуется значение широты для автоматического ее расчета.

- area – площадь водосбора ($км^2$),
- lat – географическая широта (°).

Если значения параметров известны априори, они могут быть установлены пользователем при создании модели, однако как правило известны только некоторые интервалы значений для данного региона и необходима процедура калибровки. В библиотеке LuMod она реализована методом Монте-Карло, который представляет собой случайный перебор множества комбинаций параметров в заданных границах, которые пользователю необходимо задать для исследуемого объекта.

В библиотеке AirGr основные входные данные, требуемые для работы модели, включают в себя: временные ряды значений осадков, температуры, испаряемости, стока в замыкающем створе, широту и площадь водосбора. Также в модели CemaNeige предусмотрен учёт гипсографической кривой для моделирования снежного покрова отдельно по высотным зонам (для целей данной работы не использовалось).

Далее необходимо разделить модель на калибровочную и тестовые части. После выбора метода калибровки (в данном случае калибровка Мишеля) и метрики качества (NSE) запускается встроенная процедура калибровки. Метод калибровки Мишеля сочетает алгоритмы глобального и локального поиска. На первом этапе в пространстве параметров (сетке значений с определённым для каждого параметра шагом) находится вектор значений, в котором достигается максимум функции оптимизации. Далее в близлежащей области осуществляется локальный поиск с меньшим шагом [4]. Этот метод существенно отличается от используемого в библиотеке LuMod метода Монте-Карло.

В случаях, когда на предшествующий период уже был произведён модельный расчёт, новая модель может быть построена с учётом начальный условий: слоя воды в ёмкостях X1 и X3, ординат единичного гидрографа, содержания воды в снеге и его показателя температуры для модели CemaNeige (таблица 2).

Также существует программная реализация моделей формирования речного стока возможность интерактивного (reactivity) изменения параметров модели при помощи функции ShinyGR из пакета airGRteaching (рисунок 5), принимающей на вход исходные ряды данных и выполняющая калибровку на выбранный период. Это позволяет наглядно показать влияние различных значений коэффициентов модели на форму результирующего гидрографа, наполнение отдельных модельных емкостей и результирующие коэффициенты качества.

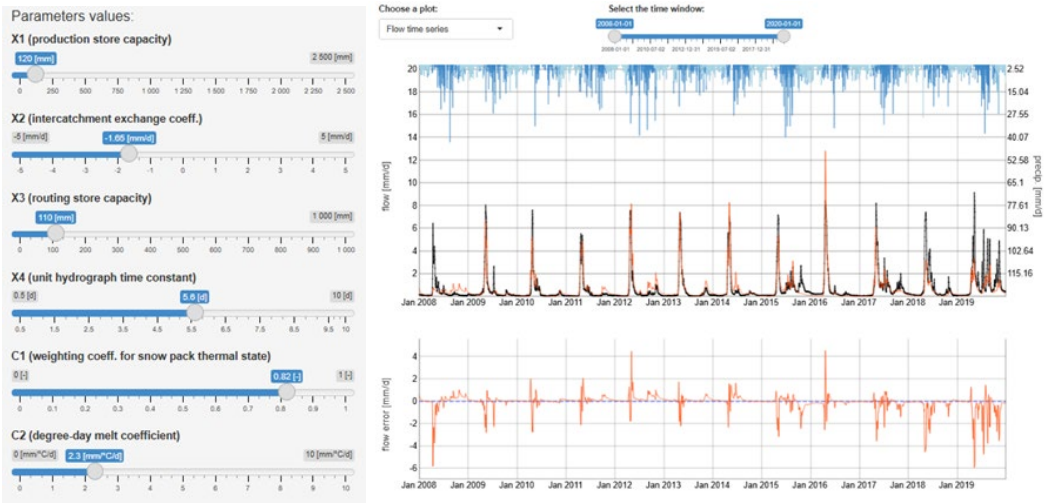


Рисунок 5. Окно интерактивного изменения параметров модели в режиме shinyGR
Figure 5. Interactive model parameter modification window in shinyGR mode

Необходимо отметить, что ввиду большого числа разновидностей модели, способов калибровки невозможно выполнить построение, калибровку и запуск модели в рамках одной функции. Однако для последовательного выполнения всех этапов моделирования может быть создана пользовательская функция, включающая различные функции пакета airGR. В данном примере функция принимает на вход исходные ряды данных и границы периодов калибровки и валидации, выполняет калибровку и моделирование на соответствующих периодах, выдаёт список выходных объектов: результат калибровки, графики, начальные условия, модельные расходы, значения NSE для периодов калибровки и валидации.

Результаты расчёта на основе данных метеорологических наблюдений

В первую очередь рассмотрим результаты калибровки и валидации с использованием данных метеорологических наблюдений. При расчёте по HBV полученные значения NSE и KGE для периода калибровки (Ошиб, Вельва) составляют 0,63 и 0,53 соответственно (таблица 3), значения обеих метрик позволяют сделать вывод о приемлемом для концептуальных моделей качестве. При использовании GR4J значения метрик ещё выше и составляют 0,86 и 0,87.

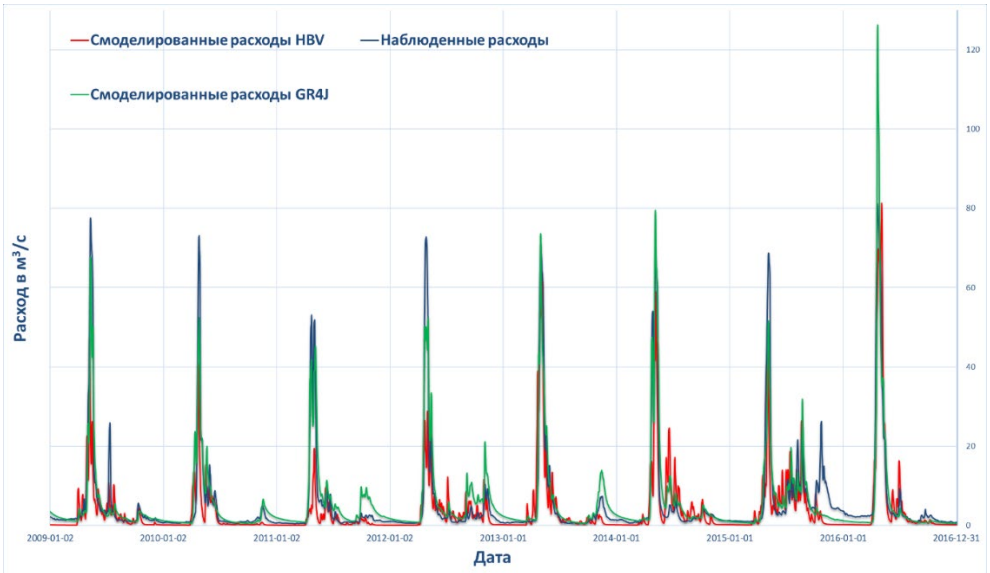


Рисунок 6. Результаты калибровки моделей HBV и GR4J для реки Вельва
Figure 6. Calibration results of the HBV and GR4J models for the Velva River

Таблица 3. Значения метрик по результатам калибровки для HBV и GR4J (Вельва, Ошиб)
Table 3. Metric values based on calibration results for HBV and GR4J (Velva, Oshib)

Метрика	Калибровка HBV	Калибровка GR4J
NSE	0,62	0,86
KGE	0,53	0,87

На этапе валидации наблюдается существенное снижение (до менее чем 0,5) значений метрик качества для модели HBV, однако модель GR4J сохраняет способность к воспроизведению гидрографов – NSE и KGE равны 0,61 и 0,42 соответственно (рисунок 6).

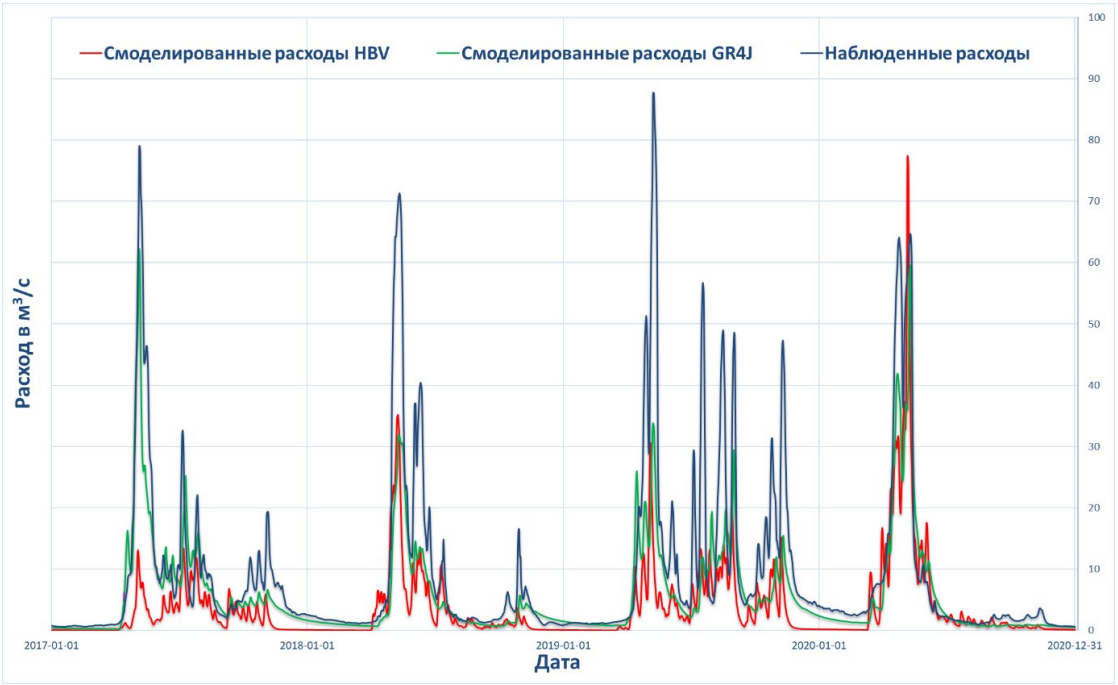


Рисунок 7. Результаты валидации моделей HBV и GR4J на реке Вельва
Figure 7. Validation results of the HBV and GR4J models for the Velva River

Таблица 4. Метрики валидации реки Вельва для HBV и GR4J
Table 4. Validation metrics of the Velva River for HBV and GR4J

Метрика	Валидация HBV	Валидация GR4J
NSE	0,31	0,61
KGE	0,14	0,42

Стоит также отметить, что применённый в работе простой алгоритм калибровки, основанный на генерации случайных наборов параметров методом Монте-Карло и реализованный в библиотеке LuMod, не во всех случаях обеспечивает достижение высоких значений NSE при единичном запуске процедуры подбора. Это связано с вероятностной природой метода, при которой пространство параметров исследуется случайно и без направленного поиска оптимума, что может приводить к пропуску областей с наилучшими решениями. Тем не менее, благодаря своей вычислительной эффективности, простоте реализации и отсутствию требований к сложной настройке, данный подход остаётся удобным инструментом для первичной калибровки моделей [21].

Для реки Буктырмы полученные на этапе калибровки значения NSE также можно охарактеризовать как удовлетворительные. Меньшие, чем для Вельвы, значения NSE связаны с характерным для Буктырмы водным режимом,

осложненным частыми дождевыми паводками, которые зачастую не подкреплены данными наблюдений на метеостанции и приводят к существенным ошибкам моделирования.

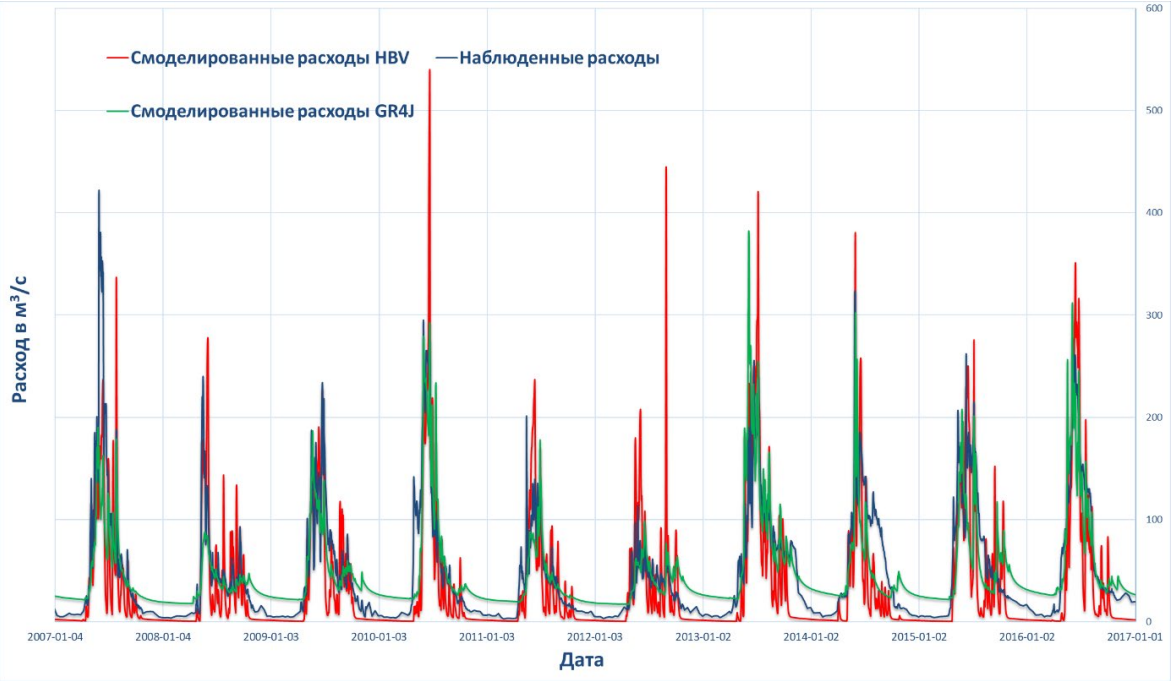


Рисунок 8. Результаты калибровки моделей HBV и GR4J на реке Буктырма
Figure 8. Calibration results of the HBV and GR4J models for the Bukhtarma River

Таблица 5. Значения метрик по результатам калибровки HBV и GR4J на реке Буктырма
Table 5. Metric values based on calibration results for HBV and GR4J for the Bukhtarma River

Метрика	Калибровка HBV	Калибровка GR4J
NSE	0,56	0,66
KGE	0,67	0,7

При переходе от этапа калибровки к независимому периоду валидации (рисунок 9) существенного ухудшения качества моделирования не наблюдается (таблица 6), что свидетельствует о надёжности используемых моделей. Для модели HBV отмечается незначительное снижение значения NSE на 0,11, что, в отличие от первого примера для реки Вельвы, является вполне приемлемым.

В то же время модель GR4J демонстрирует противоположную ситуацию: значение NSE на валидационном периоде оказывается даже больше на 0,03. Подобное поведение может быть связано с более удачной параметризацией модели GR4J, обеспечивающей лучшую устойчивость к вариациям входных данных, а также с особенностями гидрометеорологических условий рассматриваемых периодов. В совокупности полученные результаты подтверждают, что обе модели не подвержены выраженному переобучению, а их параметры обладают достаточной переносимостью на независимые временные интервалы, при этом GR4J демонстрирует несколько более высокую робастность в условиях проведённого эксперимента.

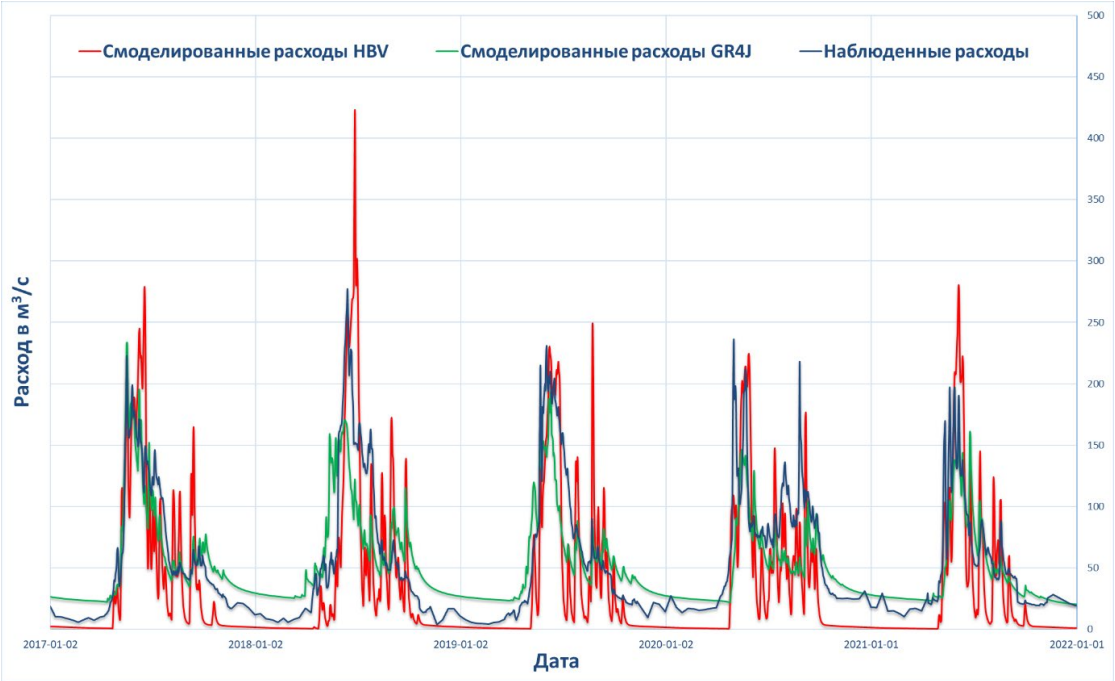


Рисунок 9. Результаты валидации моделей HBV и GR4J на реке Буктырма
Figure 9. Validation results of the HBV and GR4J models for the Bukhtarma River

Таблица 6. Метрики валидации реки Буктырма для HBV и GR4J
Table 6. Validation metrics of the Bukhtarma River for HBV and GR4J

Метрика	Валидация HBV	Валидация GR4J
NSE	0,45	0,69
KGE	0,6	0,67

После оценки итоговых метрик было получено представление, что это далеко не самые лучшие результаты. Так как калибровка проводилась несколько раз для проверки ее стабильности, было принято решение в качестве исходных данных использовать атмосферный реанализ, так как проблема результатов могла быть вызвана значительным удалением метеостанций от рассматриваемых водосборов. Включение реанализа обеспечило более репрезентативное описание климатических условий, что привело к существенному улучшению качества калибровки и повышению согласованности моделируемых и наблюдаемых гидрографов.

Результаты расчёта на основе данных реанализа

Далее аналогично рассмотрим полученные для калибровочного и валидационного периода результаты расчётов по HBV и GR4J с использованием данных атмосферного реанализа.

Как нетрудно заметить (рисунок 10, таблица 7), переход к более репрезентативным для водосбора данным реанализа позволил достичь на калибровочном периоде заметно более высоких значений обоих показателей для обеих моделей.

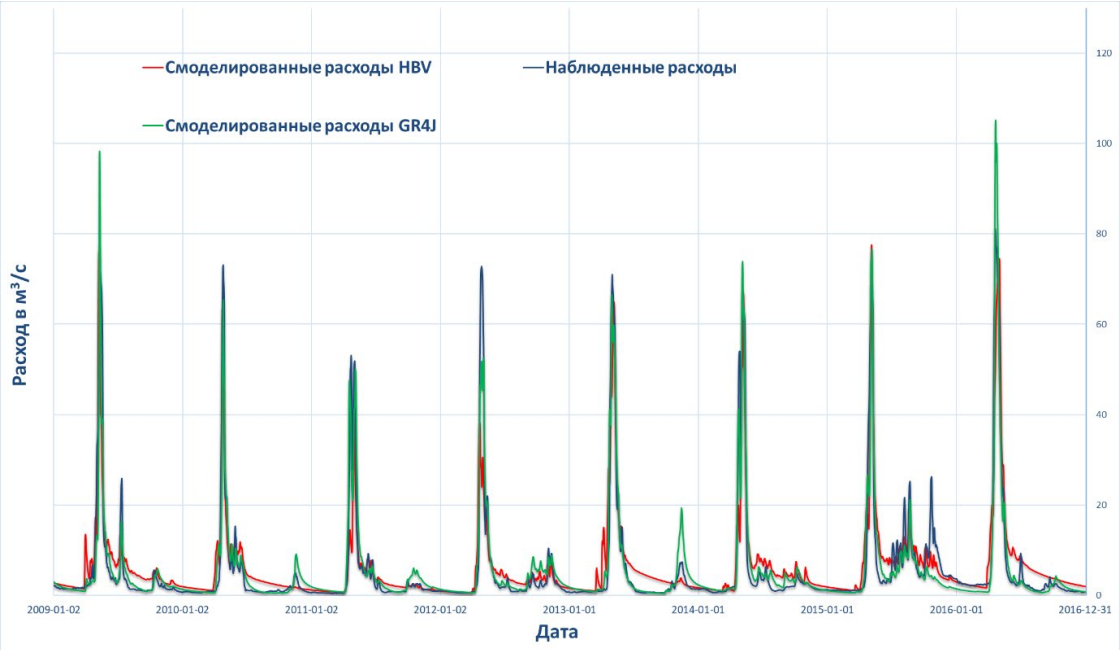


Рисунок 10. Результаты калибровки моделей HBV и GR4J для реки Вельва (исходные данные – реанализ)
Figure 10. Calibration results of the HBV and GR4J models for the Velva River (input data: reanalysis)

Таблица 7. Метрики калибровки для HBV и GR4J для реки Вельва на данных реанализа
Table 7. Calibration metrics for HBV and GR4J for the Velva River using reanalysis data

Метрика	Калибровка HBV	Калибровка GR4J
NSE	0,8	0,89
KGE	0,74	0,91

На валидационном периоде обе модели сохраняют близкое к высокому качество воспроизведения гидрографа (рисунок 11, таблица 8). Можно заметить также некоторое преимущество модели HBV в моделировании паводков во время летне-осенней межени.

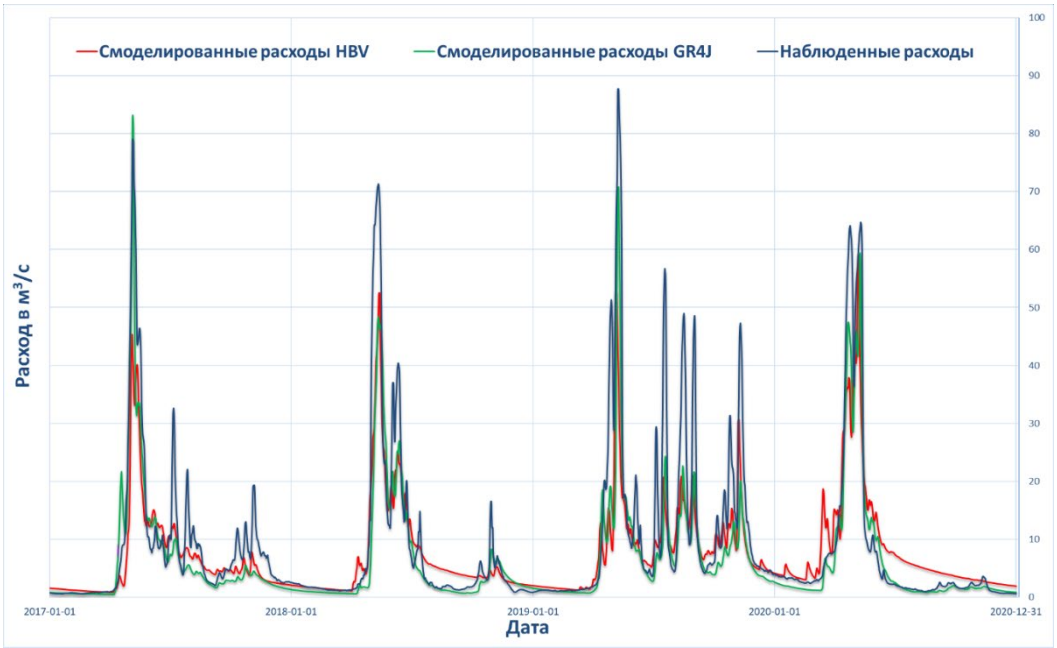


Рисунок 11. Результаты валидации моделей HBV и GR4J для реки Вельва (исходные данные – реанализ)
Figure 11. Validation results of the HBV and GR4J models for the Velva River (input data: reanalysis)

Таблица 8. Метрики результатов валидации HBV и GR4J для реки Вельва на данных реанализа
Table 8. Metrics of validation results for HBV and GR4J for the Velva River using reanalysis data

Метрика	Валидация HBV	Валидация GR4J
NSE	0,68	0,75
KGE	0,54	0,57

По результатам калибровки и валидации моделей для реки Вельва на исходных данных различных источников, можно сделать вывод, что модели в целом хорошо воспроизводят различные фазы гидрологического режима. Расчёт по данным реанализа привёл к увеличению значений NSE на 0,1 для калибровки и 0,25 для валидации в среднем для обеих моделей.

Результаты калибровки моделей для Буктырмы (рисунок 12) так же показывают хорошие значения метрик качества (таблица 9). Обе модели воспроизводят гидрограф с сопоставимой точностью, несколько лучшей оказывается GR4J.

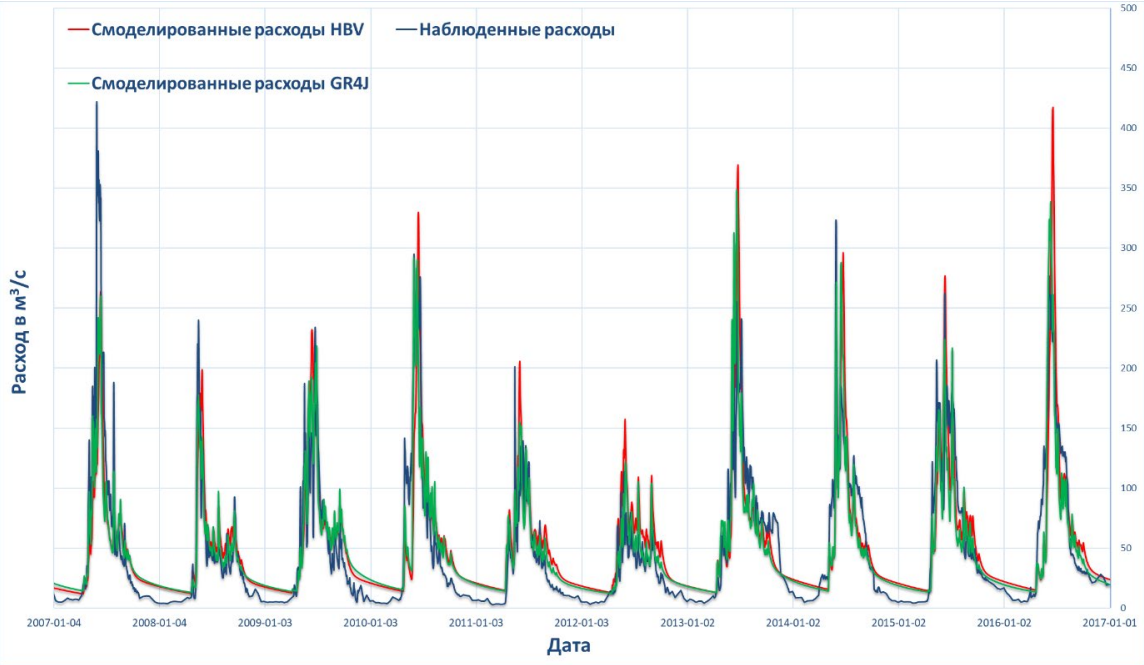


Рисунок 12. Результаты калибровки моделей HBV и GR4J на реке Буктырма (исходные данные – реанализ)
Figure 12. Calibration results of the HBV and GR4J models for the Bukhtarma River (input data: reanalysis)

Таблица 9. Метрики результатов калибровки HBV и GR4J для реки Буктырма на данных реанализа
Table 9. Metrics of calibration results for HBV and GR4J for the Bukhtarma River using reanalysis data

Метрика	Калибровка HBV	Калибровка GR4J
NSE	0,71	0,79
KGE	0,80	0,82

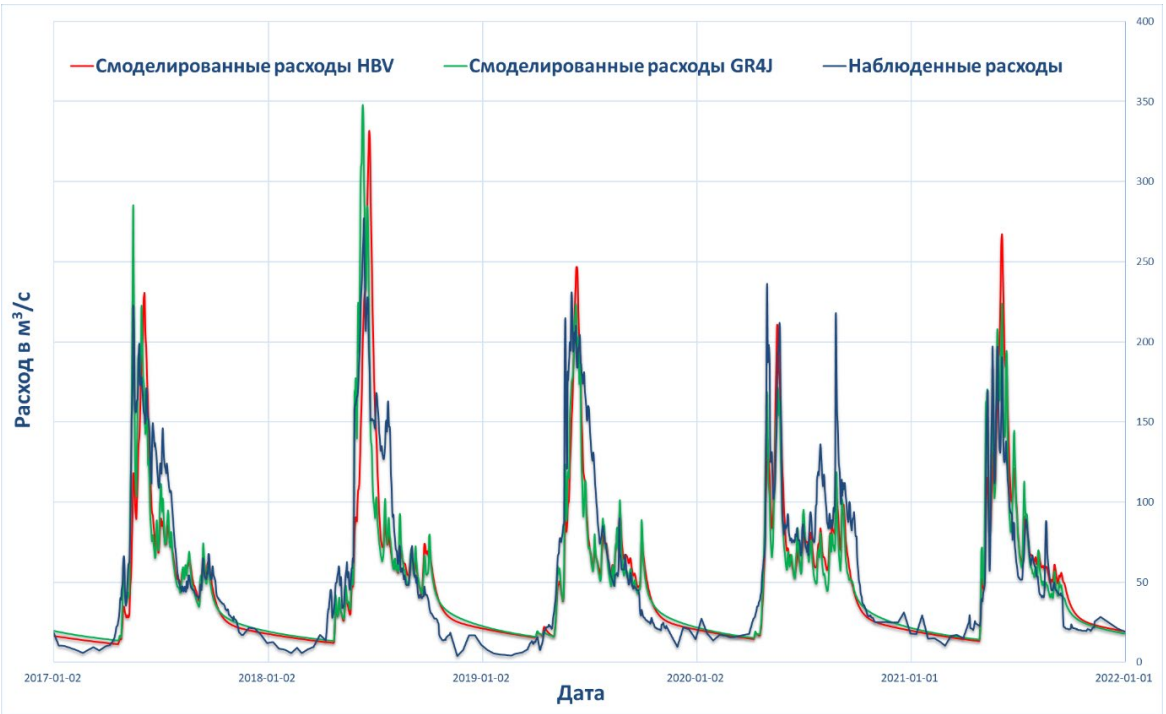


Рисунок 13. Результаты валидации моделей HBV и GR4J для реки Буктырма (исходные данные – реанализ)

Figure 13. Validation results of the HBV and GR4J models for the Bukhtarma River (input data: reanalysis)

Таблица 10. Метрики валидации реки Буктырма для HBV и GR4J на данных реанализа

Table 10. Validation metrics of the Bukhtarma River for HBV and GR4J using reanalysis data

Метрика	Валидация HBV	Валидация GR4J
NSE	0,76	0,81
KGE	0,83	0,85

По результатам калибровки и валидации моделей на реке Буктырма, так же, как и для реки Вельва, можно отметить хорошее воспроизведение гидрографов. Значения NSE по сравнению с калибровкой и валидацией на исходных данных наблюдений с метеостанций в среднем выросли на 0,14 для калибровки и 0,22 для валидации. Так же стоит отметить необычную особенность повышения значений метрик на валидационном периоде.

Обсуждение результатов

В результате сравнения моделей HBV и GR4J (рисунки 11, 13) можно сделать вывод, что GR4J показывает уровень качества лучше, что было продемонстрировано тестированием на общедоступном наборе материалов гидрометеорологических наблюдений (рисунки 7, 11) как по равнинному водосбору реки Вельва, так и по полугорному водосбору реки Буктырма. Модель HBV показала более низкие значения метрик, что можно объяснить бóльшим числом параметров и сравнительно более простым алгоритмом их подбора при калибровке методом Монте-Карло. Модель GR4J, благодаря меньшей структурной сложности и более адаптированному методу калибровки, продемонстрировала устойчивость, что подтверждается относительно небольшим понижением метрик качества при переходе от обучающей выборки к валидационной (таблицы 5, 8 и 10).

Различия между моделями становятся особенно заметны при анализе стока в период межени и паводков. GR4J позволяет точнее моделировать периоды с устойчиво низкими и высокими расходами, в то время как HBV занижает и завышает их, соответственно. В данной работе при калибровке использовался

NSE на данных без преобразования ряда стока, что приводит к увеличенной чувствительности моделей к пиковым значениям во время половодья и в межень.

На основе результатов моделирования, можно заключить, что обе программных реализации моделей HBV и GR4J (LuMod и airGR), доступные для широкого круга пользователей, могут быть применены как в исследовательских целях, так и в образовательной практике. Возможность визуализации, а также достаточно полная документация к программным пакетам, позволяет в относительно короткий срок освоить методы калибровки и интерпретации результатов.

Выводы

Модели HBV и GR4J остаются одними из наиболее применяемых концептуальных моделей в гидрологии благодаря своей простоте, хорошей воспроизводимости и реализации на распространенных и широко используемых языках программирования. На примере моделирования гидрографа рек Вельва и Буктырма была показана успешная реализация обеих моделей к различным условиям формирования стока при наличии базовых данных метео- и гидрологических наблюдений. Дополнительно, была выполнена оценка возможностей использования данных глобального атмосферного реанализа для улучшения качества моделирования в случае нерепрезентативности данных метеорологических измерений. Показано существенное улучшение в этом случае результатов расчетов речного стока для обоих водосборов.

Результаты исследования показывают, что современные реализации моделей HBV и GR4J в библиотеках LuMod и airGR, при наличии базовых знаний программирования, позволяют эффективно адаптировать их для работы с водосборами в различных физико-географических условиях. Это возможно благодаря качественной документации библиотек, удобной реализации алгоритмов моделей со встроенными средствами калибровки параметров и наличию глобальных метеоданных в открытых источниках. Однако стоит сказать и об ограничениях, к которым можно отнести чувствительность результатов к качеству исходных данных, что было показано при сравнении калибровки и валидации на исходных данных с метеостанций с полученными результатами расчетов по метеоданных с реанализа. Так же необходимо учитывать ручной выбор периодов калибровки и валидации. Тем не менее, полученные результаты демонстрируют, что имеющиеся в открытом доступе минимально необходимые для расчёта данные и программные средства позволяют выполнить моделирование стока в различных физико-географических условиях с приемлемой точностью.

Полученные в ходе подготовки данной статьи исходные программные коды размещены в открытом репозитории[9]. Репозиторий содержит описание структуры проекта, инструкции по запуску, сведения об используемых языках программирования, версиях библиотек, а также сопроводительную документацию (README). Представленные материалы могут быть использованы в качестве основы для решения широкого круга задач концептуального моделирования речного стока.

Благодарности

Работа выполнена в рамках темы № FMWZ-2025-0001 Государственного задания Института водных проблем Российской академии наук.

Acknowledgments

This work was carried out as part of Project No. FMWZ-2025-0001 under the State Assignment of the Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences.

[9] Мирошниченко А.Д. Репозиторий “hydro_models” [Электронный ресурс]. URL: https://github.com/Inlupa/hydro_models/tree/main (дата обращения: 06.05.2026)

Литература / References

1. Мотовилов Ю. Г., Гельфан А. Н. Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М.: РАН, 2018. 296 с. DOI: 10.31857/S9785907036222000001.
2. Mazzoleni M., Amaranto A., Solomatine D. –P. Integrating Qualitative Flow Observations in a Lumped Hydrologic Routing Model. Water Resources Research, 2019, vol. 55, №7, pp.6088–6108. DOI:10.1029/2018WR023768.
3. Refsgaard J.C., Knudsen J. Operational Validation and Intercomparison of Different Types of Hydrological Models. Water Resources Research, 1996, vol. 32, no. 7, pp. 2189–2202. DOI:10.1029/96WR00896.
4. Coron L., Thirel G., Delaigue O. et al. The suite of lumped GR hydrological models in an R package. Environmental Modelling & Software, 2017, vol .94, pp.166–171. DOI:10.1016/j.envsoft.2017.05.002.
5. Bergström S. Development and Application of a Conceptual Runoff Model for Scandinavian Catchments SMHI Rep. RHO 7. 1976.134 p.
6. Slater L. J., Thirel G., Harrigan S. et al. Using R in hydrology: a review of recent developments and future directions. Hydrology and Earth System Sciences, 2019, vol. 23, no. 7. pp. 2939–2963. DOI:10.5194/hess-23-2939-2019.
7. Lidén R. A new approach for estimation suspended sediment yield. Hydrology and Earth System Sciences, 1999, vol.3, no.2. pp.285–294. DOI:10.5194/hess-3-285-1999.
8. Pettersson A., Arheimer B., Johansson B. Nitrogen Concentrations Simulated with HBV-N: New Response Function and Calibration Strategy. Hydrology Research, 2001, vol. 32, no. 3, pp. 227–248. DOI:10.2166/nh.2001.0014.
9. Solomatine D. P., Shrestha D. L. A novel method to estimate model uncertainty using machine learning techniques / Water Resources Research, 2009, vol. 45, no. 12. p. 1181. DOI:10.1029/2008WR006839.
10. Perrin C., Michel C., Andréassian V. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. Journal of Hydrology, 2003, vol.279, no. 1–4, pp.275–289. DOI:10.1016/S0022-1694(03)00225-7.
11. Oudin L., Michel C., Anctil F. Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model? Journal of Hydrology, 2005, vol. 303, no. 1–4, pp.275–289. DOI:10.1016/j.jhydrol.2004.08.025.
12. Ayzel, G. OpenForecast v2: Development and Benchmarking of the First National-Scale Operational Runoff Forecasting System in Russia. Hydrology, 2021, vol. 8, no. 1, p.3. DOI:10.3390/hydrology8010003.
13. Mathevet R. Camargue incertaine. Sciences, usages et natures. Ed. Buchet Chastel, Col. Écologie, Paris, 2004. Pp.99–100. DOI: 10.4000/mediterranee.356.
14. Lahnik O., Tramblay Y., Hanich L. Future water resources and droughts in the Atlas Mountains of Morocco under a high-emission climate scenario. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2025, vol. 59, no. 5, p. 102371. DOI:10.1016/j.ejrh.2025.102371.
15. Wijayarathne D. B., Coulibaly P. Identification of hydrological models for operational flood forecasting in St. John's, Newfoundland, Canada. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2020, vol. 27, p.100646. DOI:10.1016/j.ejrh.2019.100646.
16. Valéry A., Andréassian V., Perrin C. As simple as possible but not simpler': What is useful in a temperature-based snow-accounting routine? Part 2 – Sensitivity analysis of the Cemaneige snow accounting routine on 380 catchments. Journal of Hydrology, 2014, vol. 517, no. 12., pp.1176–1187. DOI:10.1016/j.jhydrol.2014.04.058.
17. Абрамов Д. В., Курочкина Л. С., Морейдо В. М. Разработка базы данных гидрологических, метеорологических и физико-географических характеристик для речных водосборов на территории

Российской Федерации // Метеорология и гидрология. 2026. Вып. 3, С.70–83. DOI:10.52002/0130-2906-2026-3-70-83.

18. Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A. et al. ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. Earth System Science Data, 2021, vol.13, no. 9. pp. 4349–4383. DOI:10.5194/essd-13-4349-2021.
19. Chen J., Brissette F. P. Hydrological Modelling Using Proxies for Gauged Precipitation and Temperature. Hydrol. Process., 2017, vol. 31, pp. 3881–3897. DOI:10.1002/HYP.11304.
20. Cirilo J. A., de Oliveira D.S., de Figueiredo Ferraz G., Alves F.H.B., de Lucena Corrêia Campos M., de Araújo L.F., de Oliveira O.F., de Souza J.D.S., da Silva Correa, S., Vasconcelos H.X.T. et al. From Small to Mega River Basins−adaptation of a Lumped Hydrological Model for Runoff Simulation. J. Hydrol., 2026, 671, 135263. DOI:10.1016/j.jhydrol.2026.135263.
21. Wang A., Solomatine D. P. Practical Experience of Sensitivity Analysis: Comparing Six Methods, on Three Hydrological Models, with Three Performance Criteria. Water, 2019, vol .11, no. 5., p. 1062. DOI:10.3390/w11051062.

Поступила в редакцию / Received 27.03.2026
Принята к публикации / Accepted 27.05.2026

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мирошниченко Антон Дмитриевич, аспирант, Институт водных проблем РАН, г. Москва, Россия; главный эксперт, ООО «СИБИНТЕК-СОФТ»; ORCID: 0009-0007-5343-0847, SPIN-код: 9777-4758; anton199823@gmail.com.

Головнин Кирилл Игоревич, инженер, Институт водных проблем РАН, г. Москва, Россия; SPIN-код: 9905-4381, ORCID: 0009-0001-9551-8755; e-mail: golovnin98@bk.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anton D. Miroshnichenko, Postgraduate Student, Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; Chief Expert, SIBINTEK-SOFT; ORCID: 0009-0007-5343-0847, SPIN-code: 9777-4758; e-mail: anton199823@gmail.com.

Kirill I. Golovnin, engineer, Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; SPIN-code: 9905-4381, ORCID: 0009-0001-9551-8755; e-mail: golovnin98@bk.ru.

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

Научная статья / Scientific paper
УДК: 504.06: 624:551
DOI: 10.34753/HS.2026.8.1.47

Адаптационные климатические проекты: обеспечение экологической безопасности в чрезвычайных ситуациях и решение инженерно-геологических проблем

В.Н. Безносов[1,2], А.Ю. Виноградов[1], О.Е. Вязкова[2], В.А. Обязов[1], А.Л. Суздалева[2,3]
[1] ООО НПО «Гидротехпроект», г. Валдай, Россия;
[2] Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, г. Москва, Россия;
[3] Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», г. Москва, Россия
e-mail: SuzdalevaAL@yandex.ru.

Аннотация. В условиях глобального потепления показана важность разработки адаптационных климатических проектов, целью которых является обеспечение нормальной жизнедеятельности населения в изменившихся условиях окружающей среды. Дано обобщающее определение термина климатогенная чрезвычайная ситуация. Обоснована значимость исследований в области инженерной геологии для минимизации негативных последствий этих событий. В качестве основных атрибутов климатогенных чрезвычайных ситуаций рассматриваются: неизбежность, глобальная распространенность, ожидаемость (сезонная периодичность), закономерность развития, частоты возникновения и возрастания уровня воздействия негативных факторов, а также их необратимость. Изменение климата неизбежно сопровождается образованием комплекса опасных геологических процессов и явлений. По этой причине разработка адаптационных климатических проектов должна учитывать как многолетние тренды гидрометеорологических показателей, так и изменения структуры и свойств поверхностных слоев земной коры. Для обозначения объектов с высоким уровнем риска разрушения и деградации при изменении климата предложен термин «критическая климатическая уязвимость». Выделено пять типов адаптационных климатических проектов: урбоклиматические, техноклиматические, агроклиматические, природноклиматические и структурно-организационные. Урбоклиматические проекты обеспечивают сохранение благоприятных условий жизни городского населения, техноклиматические – работу инженерно-технических систем, транспортных и иных коммуникации. Агроклиматические проекты предотвращают гибель посевов и сельскохозяйственных животных, природноклиматические – сохраняют природные объекты. Структурно-организационные климатические проекты включают необходимые в условиях глобального потепления изменения характера размещения населенных пунктов и стимулирование развитие новых видов деятельности, обеспечивающих занятость населения и достаточный уровень доходов. Все типы адаптационных климатических проектов предложено рассматривать как действия по практической реализации концепции устойчивого развития. Обоснована необходимость проведения специальных инженерно-экологических изысканий при разработке адаптационных климатических проектов и в процессе создания «адаптивных городов».

Ключевые слова: климатогенная чрезвычайная ситуация; геологическая среда; опасные геологические процессы; критическая климатическая уязвимость; адаптивный город.

Для цитирования: Безносов В.Н., Виноградов А.Ю., Вязкова О.Е., Обязов В.А., Суздалева А.Л. Адаптационные климатические проекты: обеспечение экологической безопасности в чрезвычайных ситуациях и решение инженерно-геологических проблем // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2026. Т. 8. Вып. 1. С. 47–59. DOI: 10.34753/HS.2026.8.1.47.

Climate Adaptation Projects: Ensuring Ecological Safety in Emergency Situations and Solving Engineering-Geological Problems

Viktor N. Beznosov[1,2], Alexey Yu. Vinogradov[1], Olga E. Vyazkova[2],
Victor A. Obyazov[1], Antonina L. Suzdaleva[3]
[1] Scientific and Industrial Research Association "Gidrotehproekt", Valday, Russia; [2] Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia; [3] National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russia
e-mail: suzdalevaal@yandex.ru

Abstract. In the context of global warming, the importance of developing climate adaptation projects aimed at ensuring the well-being of the population in changing environmental conditions is demonstrated. A general definition of the term "climatogenic emergency" is provided. The importance of research in engineering geology for minimizing the negative consequences of these events is substantiated. The key attributes of climatogenic emergencies are considered to be: inevitability, global prevalence, predictability (seasonal periodicity), development patterns, frequency of occurrence and increase in the impact of negative factors, and their irreversibility. Climate change is inevitably accompanied by the emergence of a range of hazardous geological processes and phenomena. For this reason, the development of climate adaptation projects must consider both long-term trends in hydrometeorological indicators and changes in the structure and properties of the surface layers of the Earth's crust. The term "critical climate vulnerability" is proposed to denote objects with a high risk of destruction and degradation due to climate change. Five types of climate adaptation projects are identified: urban climate projects, technological climate projects, agroclimatic projects, natural climate projects, and structural-organizational projects. Urban-climatic adaptation projects ensure the maintenance of favorable living conditions for the urban population, while adaptation techno-climatic projects ensure the operation of engineering systems, transportation, and other infrastructure. Agroclimatic adaptation projects prevent the loss of crops and livestock, and natural-climatic adaptation projects preserve natural features. Structural-organizational adaptation climate projects include changes to the distribution of settlements necessary in conditions of global warming and stimulation of new activities that provide employment and adequate income. All types of climate adaptation projects are proposed to be considered as actions for the practical implementation of the concept of sustainable development. The need for specialized engineering-ecological surveys in the development of climate adaptation projects and activities aimed at creating "adaptive cities" is substantiated.

Keywords: climatogenic emergency; geological environment; hazardous geological processes; critical climate vulnerability; adaptive city.

For citation: Beznosov V. N., Vinogradov A. Yu., Vyazkova O. E., Obyazov V. A., Suzdaleva A. L. Climate Adaptation Projects: Ensuring Ecological Safety in Emergency Situations and Solving Engineering-Geological Problems. Hydrosphere. Hazard processes and phenomena, 2026, vol. 8, iss. 1, pp. 47–59. DOI: 10.34753/HS. 2026.8.1.47. (In Russian; abstract in English).

Введение

Климат – это основной фактор, определяющий структуру экосистем, исторически сложившихся в том или ином регионе, жизненные циклы организмов и формы традиционной деятельности населения. От его характера во многом зависит размещение, конструктивно-компоновочные особенности и назначение создаваемых человеком сооружений. Существующие природные, природно-техногенные и техногенные (антропогенные) объекты могут нормально функционировать только в диапазоне климатических флуктуаций, свойственных данному региону. Помимо этого, устойчивое изменение гидрометеорологических условий, как правило, вызывает возникновение серьезных инженерно-геологических проблем. Происходят изменения структуры и свойств земной коры на участках строительства и эксплуатации различного рода сооружений и коммуникаций. К ним, например, относятся такие явления как подтопление городских территорий или интенсификация на них карстово-суффозионных процессов, вызывающих проседание земной поверхности, деформацию

зданий и возникновение провалов. Таким образом, изменение климата создает обширный комплекс угроз для жизни людей, а также повышает вероятность нанесения значимого экономического и экологического ущерба. При достижении определенного уровня эти риски создают чрезвычайную ситуацию (ЧС), то есть условия, в которых продолжение обычной жизнедеятельности людей становится невозможным. Несмотря на то, что события подобного рода происходят с возрастающей частотой и сопровождаются усилением негативных последствий [1], термин «климатогенные чрезвычайные ситуации», то есть ЧС, вызванные изменением климата, не закреплен в правовых документах и практически не используется в научных работах. При описании подобных явлений все чаще употребляются словосочетания «климатическая катастрофа» и «климатический кризис» [2–3]. Но эти термины в полной мере не отражают сути явлений и, что еще более важно, ограничивают анализ спектра ЧС, обусловленных изменением климата. Смысловое различие в данном случае во многом определяет методологический поход к решению проблем. Климатическая ситуация – это сочетание сложившихся в какой-то период температурно-влажностных и гидрометеорологических условий. Следовательно, климатическая катастрофа или кризис – это крайне неблагоприятная ситуация подобного рода. При ее ликвидации основные действия направлены на спасение людей и сохранение материальных активов. В отличие от этого, климатогенная ЧС – это сочетание условий, не только прямо, но и косвенно обусловленных изменением климата. Часто они развиваются постепенно в форме тенденций ухудшения состояния окружающей среды, утраты ее ресурсов и повышения рисков при осуществлении традиционных форм деятельности. Одним из примеров климатогенной ЧС, вызванной изменением гидрометеорологических условий, является снижение урожайности основных для данного региона сельскохозяйственных культур, которое на определенным этапе становится причиной массового голода. Также к ЧС подобного рода можно отнести постепенное обводнение грунтов и горных пород при значительном увеличении количества атмосферных осадков, провоцирующем образование катастрофических оползней. Поэтому прогноз и минимизация ущербов климатогенных ЧС должны основываться не только на анализе трендов гидрометеорологических показателей, но и на результатах мониторинга структуры и свойств поверхностных слоев земной коры. Только на основе подобного междисциплинарного подхода можно разработать меры, реализация которых позволит обеспечить нормальную жизнедеятельность населения в новых условиях. Совокупность подобных действий обозначается как «адаптационные климатические проекты» [4]. Их задачей является не обеспечение выживания населения в экстремально дискомфортной обстановке или его спасение, например, благодаря доставке гуманитарной помощи, а формирование в новых климатических условиях благоприятной окружающей среды, в том числе обеспечивающей экологическую безопасность населения, включая минимизацию экологических рисков [5–6]. Цель настоящей статьи заключается в обобщении накопленного опыта в этой области и выработке единого методологического подхода к предотвращению негативных последствий климатогенных ЧС.

Методологическая основа адаптационных климатических проектов

Тренды изменения климата в период происходящего глобального потепления для большинства регионов планеты уже установлены. Попытки сдерживания этого процесса путем коррекции содержания парниковых газов в атмосфере позитивных результатов не дали. Вероятно, несмотря на многочисленные декларации международных организаций, этого не следует ожидать и в будущем. Уже сейчас масса парниковых газов (CO_2 и CH_4), выделяющихся на огромных площадях деградирующей (оттаивающей) многолетней мерзлоты за счет разложении содержащихся в ней органических веществ, значительно превышает объем планируемого сокращения промышленных выбросов [7]. Бюрократические инициативы, такие как контроль за «углеродным следом

продукции», представляют собой инструмент политической борьбы. Многие известные специалисты изначально отрицали связь глобального потепления с деятельностью человека, рассматривали его как этап постоянно происходивших в истории Земли климатических циклов [8–9]. С этой точки зрения использование климатических трендов как основы деятельности по адаптации населения к изменению условий и обеспечению экологической безопасности вполне обосновано.

Установлению причинно-следственной связи между потеплением климата и формированием инженерно-геологических условий уделяется недостаточное внимание. Под ними в контексте рассматриваемой проблемы понимаются особенности структуры и свойств земной коры, от которых зависит безопасность осуществления на ее поверхности различных видов человеческой деятельности, прежде всего, возведение, а также эксплуатация различного рода техногенных и природно-техногенных объектов.

Если принять, что возникновение климатогенных ЧС является проявлением многолетних трендов изменения окружающей среды, включая верхние слои литосферы, то все события подобного рода обладают следующими общими чертами.

1. Неизбежность. В отличие от техногенных, природных и биосоциальных ЧС, не спровоцированных глобальным потеплением, развитие процессов и явлений, сопровождающих трансформацию климатической системы планеты, происходит неотвратимо. Их риск нельзя снизить таким же образом, как снижают риск аварий на промышленных предприятиях – путем разработки новых правил эксплуатации оборудования или переходом на более безопасные технологии. К климатогенным ЧС население может только адаптироваться, заблаговременно приняв меры по минимизации ущербов. Так, авария на заводе может не возникнуть, но наводнения при положительном многолетнем тренде количества осадков произойдут неминуемо.

2. Глобальная распространенность. Климатогенные ЧС происходят практически на всей поверхности планеты. Их масштабы, вероятно, будут возрастать, а характер станет более разнообразным – появятся принципиально новые формы. Так, по мнению некоторых исследователей, потепление климата может спровоцировать таяние ледников Антарктиды, которое вызовет повышение уровня Мирового океана, затопление и подтопление огромных прибрежных территорий на всех материках [10]. Как следствие, в этих регионах неизбежно произойдет и трансформация поверхностных горизонтов литосферы.

3. Ожидаемость. Для большинства климатогенных ЧС с большой вероятностью можно заблаговременно определить место и время возникновения. Примером являются практически ежегодно происходящие пожары на южной границе таежной зоны Сибири. Они обусловлены периодической засухой в весенне-летний период, которая сопутствует закономерному сдвигу ландшафтно-климатических зон из-за глобального потепления [11]. В данном случае наблюдается процесс остепнения лесной зоны.

4. Неуклонное усиление факторов негативного воздействия и увеличение наносимого ими ущерба. Показатели, характеризующие различные аспекты негативного воздействия ЧС, причинами которых выступает потепление климата, все чаще превышают значения, полученные в аналогичных ситуациях за весь предшествовавший период наблюдений. В соответствии с этим им присваивается статус аномальных явлений.

5. Необратимость. Глобальное потепление – это процесс перехода климатической системы планеты из одного состояния в другое. Теоретически возможен и обратный процесс – глобальное похолодание. Но смена направления глобальных климатических изменений происходит в течение периодов времени, измеряемых как минимум сотнями лет. Поэтому с точки зрения обеспечения благоприятных условий жизнедеятельности населения и его экологической безопасности динамику климатических процессов имеет смысл анализировать только на протяжении ограниченного периода, соответствующего

продолжительности жизни нескольких поколений людей. С этой точки зрения наблюдающиеся изменения климата необратимы. Еще в большей степени необратимы спровоцированные потеплением процессы, происходящие в недрах планеты. В некоторых случаях изменения климата приводят к устойчивому состоянию окружающей среды, в которой существование людей становится невозможным. Например, это возникший в ряде регионов во второй половине XX века катастрофический дефицит водных ресурсов [12]. Для выживания населения в них необходимо практически постоянно осуществлять экстренные меры. Подобные явления следует рассматривать как хронические ЧС [13].

Цель и алгоритм разработки адаптационных климатических проектов

Совокупный анализ изложенных выше общих черт климатогенных ЧС приводит к заключению, что наиболее эффективным способом минимизации негативных последствий является создание адаптационных климатических проектов. Основной целью этой деятельности должно являться формирование устойчивой благоприятной окружающей среды, т.е. обеспечение ее экологической безопасности и снижение до приемлемого уровня риска для здоровья и жизни людей. Подобный подход к решению проблемы принципиально отличается от целей и методов работы в условиях ЧС других видов. Так, при техногенной катастрофе внимание прежде всего уделяется локализации района воздействия поражающих факторов и эвакуации населения из опасной зоны. По окончанию этих работ ЧС считается ликвидированной, и население возвращается к нормальной жизнедеятельности. При климатогенных ЧС подобный подход может дать только временный результат. Например, при закономерной повторяемости аномальных наводнений, сопровождающихся увеличением масштабов, эвакуация населения и восстановление разрушенных построек улучшит ситуацию до следующего наводнения. В данном случае решением проблемы является адаптационный климатический проект, включающий перемещение жилых зданий и иных объектов из зоны возможного затопления, а также создание (модификация) системы транспортных и иных коммуникаций. Реализация такого проекта потребует значительно больших средств, чем традиционные меры борьбы с последствиями наводнения. Но если суммировать эти затраты за несколько лет, то создание климатического проекта представится экономически оправданным.

Существует еще один аспект проблемы, также в той или иной мере сопряженный с обеспечением экологической безопасности при климатогенных ЧС. Это вопрос занятости населения в новых климатических условиях, недопущение снижения качества жизни людей и уровня их доходов. Изменение окружающей среды, вызванное периодически возникающими или хроническими климатогенными ЧС [13], нередко приводит к невозможности осуществления ранее широко практиковавшихся форм деятельности. Следовательно, одним из направлений климатических проектов должна стать корректировка или даже переориентация основных форм занятости населения [14–15].

Общность источника климатогенных ЧС и задач деятельности по их недопущению открывает широкие возможности для использования стандартного ***алгоритма решения*** данных проблем. Его основу составляет следующая последовательность действий.

1. Определение характера вероятных ЧС в данном регионе на основе анализа многолетних трендов процессов, прямо или косвенно связанных с глобальным потеплением. При анализе этих материалов следует выделять две категории явлений: импактные и постепенно развивающиеся. Первые из них – это события, происходящие в течение короткого периода времени (например, ураган или наводнение). Постепенно развивающиеся процессы закономерно изменяют условия окружающей среды на протяжении длительного периода. Нередко на начальном этапе они не сопровождаются ощутимыми негативными эффектами. Но в определенный момент они достигают уровня, при котором обеспечение нормальной жизнедеятельности населения

становится невозможным. Примером может служить увеличивающийся дефицит водных ресурсов, наблюдающийся в некоторых регионах планеты. В других регионах, напротив, происходящее повышение количества осадков приводит к развитию комплекса опасных геологических процессов и явления. Так, в результате интенсивной денудации горных пород резко усиливается образование карстовых провалов [16].

2. Проведение дополнительных инженерно-геологических изысканий. Их основной целью является актуализация материалов, полученных в предшествующий период, а также прогноз развития опасных геологических процессов и явления в условиях продолжающихся изменений климата. Реализация адаптационных климатических проектов на основе устаревших данных имеет опасные последствия. Гипотетическим примером может быть переселение людей из зоны периодического затопления на территорию, где под влиянием климатических процессов возникают условия для образования оползней или селевых потоков, которые ранее на этом участке земной поверхности не наблюдались.

3. Идентификация критических климатических уязвимостей. Для обозначения «склонности или предрасположенности» к неблагоприятному воздействию изменения климата в международном стандарте ГОСТ Р ИСО 14050-2023 «Экологический менеджмент. Словарь» (пункт 3.8.13) используется термин «уязвимость» (vulnerability). Вместе с тем данное понятие без дополнительного уточнения может иметь значительно более широкий смысл. Так, человек, находящийся на возвышенности во время грозы, уязвим для ударов молнии. Кроме того, в стандарте не указывается объект уязвимости. Может ли им являться живой организм или сооружение? Подобная неопределенность создает некоторые затруднения в использовании данного понятия. Представляется целесообразным уточнить как сам термин, так его трактовку, предложив следующее определение: климатическая уязвимость – это потенциальная подверженность какого-либо объекта, вне зависимости от его характера и происхождения, негативному воздействию, прямо или косвенно обусловленному устойчивым изменением климата. С этой точки зрения понятие «климатическая уязвимость» может применяться как к населению (его группам), так и к природным и техногенным объектам. По своему характеру и значимости данные явления весьма различны. Например, повышение летних температур может создавать угрозу теплового удара для людей, а может приводить к гибели посевов, вызывающих голод в стране. Поэтому при разработке климатических проектов важно выделить критические климатические уязвимости, т.е. те из них, которые могут привести к возникновению ЧС.

4. Типизация климатических проектов. Критические уязвимости могут играть важную роль в различных сферах жизни. В соответствии с характером уязвимостей, для обобщения опыта и внедрения удачных решений климатические проекты целесообразно разделить на следующие основные типы:

природноклиматические проекты – деятельность, направленная на сохранения в условиях глобальных климатических изменений природных объектов, служащих источником экосистемных услуг (ecosystem services) [17], т.е. выгод и благ (включая духовные), извлекаемых из естественной окружающей среды и используемых человеком для удовлетворения насущных потребностей (примером могут служить мероприятия по борьбе с вредителями леса, распространение которых вызвано потеплением климата);

агроклиматические проекты – деятельность по предотвращению гибели посевов и сельскохозяйственных животных, причиной которых прямо или косвенно является изменение климата (в качестве основного направления на современном этапе можно рассматривать ирригацию земель, подверженных засухе);

урбоклиматические проекты – меры по сохранению благоприятных для жизни условий в городах при потеплении климата (важным направлением является организация резервных источников водоснабжения [18], способных предотвратить нарушение работы водопровода и

системы канализации, а также создание (модификация) систем водоотведения, способных предотвратить, затопление и подтопление городской территории);

техноклиматические проекты – мероприятия, обеспечивающие в изменившихся условиях работу инженерно-технических систем, а также транспортных и иных коммуникаций (например, регулирование стока рек с целью сохранение условия для водных перевозок и работы ГЭС в засушливый период [19];

структурно-организационные климатические проекты, включающие необходимое в новых климатических условиях изменение характера размещения населенных пунктов и стимулирование развитие новых видов деятельности, обеспечивающих занятость населения и достаточный уровень доходов (в некоторых случаях – это переселение людей из районов климатических кризисов, при отсутствии реальной возможности обеспечить их нормальную жизнедеятельность на участках их прежнего проживания).

5. Оценка возможности комплексных и сопряженных решений. Нередко в одном и том же регионе необходима одновременная реализация нескольких различных климатических проектов. Поэтому целесообразно: рассматривать их объединение в единую комплексную программу; сохранять в качестве ее отдельных направлений цели и задачи, определенные для каждого из типов климатических проектов; оценивать экономические и административно-управленческие выгоды подобного шага. Особый интерес представляют сопряженные решения, когда результаты одного климатического проекта могут использоваться при выполнении другого. Их возможность обусловлена тем, что глобальное изменение климата приводит к перераспределению количества осадков и сдвигу границ ландшафтно-климатических зон. Одновременно в одних регионах возникает дефицит водных ресурсов, в других – наводнения. Сопряженным решением таких ЧС, способным обеспечить экологическую безопасность населения обширных территорий, является, например, создание систем отведения избыточных вод. Они могут быть созданы путем модификации уже существующих гидроэнергетических каскадов и воднотранспортных коммуникаций [20–21]. Подобные климатические проекты могут приносить финансовую выгоду при включении в формирующийся международный рынок водных ресурсов [12]. В настоящее время они уже разрабатываются и осуществляются во многих странах [22]. Другим примером сопряженного решения при разработке климатических проектов является реализуемые в Китае государственные программы смещения на север площадей возделывания некоторых культур, выращивание которых в этих районах ранее было невозможным по климатическим условиям [23], и использование освободившихся участков для получения других видов сельскохозяйственной продукции.

6. Обоснование соответствия целям устойчивого развития. Данная концепция, принятая мировым сообществом, подразумевает соответствие осуществляемых в настоящее время проектов интересам будущих поколений [24]. В соответствии с этим, во-первых, необходимо обосновать, что реализация проекта будет способствовать сохранению благоприятных экологических и экономических условий для жизни населения на протяжении неограниченно длительного периода времени. Во-вторых, поскольку климатогенные ЧС носят периодический (хронический) характер и имеют тенденцию к усилению, то в проекте должны быть представлены результаты, характеризующие наличие достаточного «запаса прочности», предусматриваемых им структур, конструкций и материалов.

Обоснование соответствия климатического проекта концепции устойчивого развития создает условия для привлечения дополнительных средств на его реализацию. Решение данного вопроса особенно важно для продолжения осуществления проекта в периоды между «климатическими кризисами», а в оптимальном варианте – до достижения климатическими изменениями критического уровня, позволяющего рассматривать их как ЧС регионального или даже межрегионального

масштаба. Так, строительство гидротехнических систем по отведению избыточных паводковых вод в засушливые регионы должно осуществляться превентивно, не в период наводнения. А инъектирование укрепляющими материалами горных пород, склонных к утрате прочностных характеристик в результате развития карстово-суффозионных процессов, должно выполняться непосредственно после получения результатов инженерно-геологического мониторинга, указывающих на риск их интенсификации в ходе происходящих изменений климата [25].

Климатические проекты и создание «адаптивных городов»

К настоящему времени большая часть человечества живет в городах, и их население продолжает неуклонно возрастать. Скопление большого количества людей на ограниченной площади и размещение на ней значительных материальных активов, с одной стороны, повышает масштабы рисков ущерба, наносимых климатогенными ЧС, с другой стороны, развитая городская инфраструктура может быть использована как основа для защиты от негативных воздействий, сопутствующих ЧС. Для решения этих проблем широкое распространение получили исследования в области создания так называемого «адаптивного города» (resilient cities).

В теоретическом плане концепция «адаптивный город» подразумевает совершенствование работы городских систем, обеспечивающих безопасность населения в ЧС и восстановление нарушенных условий жизнедеятельности по принципу «лучше, чем было», т.е. направленных не на ликвидацию сиюминутных проблем, а на достижение долгосрочного процветания города и его жителей [26]. Таким образом, основное внимание уделяется не разработке климатических проектов, защищающих регион, в котором расположен город, а совершенствованию работы внутригородских служб, их способности оперативно реагировать на возникновение ЧС.

Подобный взгляд на проблему представляется искусственно ограниченным, в котором город рассматривается как объект, способный самостоятельно противодействовать критическому изменению условий окружающей среды. Он несет опасность недоучета масштабов негативных процессов и явлений, благодаря изоляции города от событий, происходящих в регионе его размещения. Так, вместо отвода паводковых вод на основе гидротехнических систем, предназначенных для межбассейнового перераспределения стока, основное значение при защите от наводнений придается возведению берегозащитных сооружений, препятствующих затоплению городской территории. Не подвергая сомнению необходимость подобных действий, следует указать на целесообразность установления более тесной взаимосвязи между разработкой проектов в области «адаптированного города» и региональных адаптационных климатических проектов, основанных на идентификации критических климатических уязвимостей. При этом необходимо учитывать весь их спектр и превентивно разрабатывать комплекс мер по их устранению (минимизации). Например, повышение уровня Мирового океана рано или поздно потребует реализации структурно-организационных климатических проектов, включающих возведение городской застройки на новых местах. Недостаток внимания к агроклиматическим проектам может привести к дефициту в городах пищевых продуктов, а отсутствие своевременной реализации техноклиматических проектов по регулированию стока речных бассейнов – к нехватке воды в новых условиях.

Отдельное внимание следует уделять проблемам в области инженерной геологии. Поверхностные слои земной коры на большей части городской территории подверглись глубокой и многоплановой техногенной трансформации (техногенезу). Для их обозначения используется термин «геологическая среда» [27]. Несмотря на высокую неоднородность этого образования, всем его формам присуще одно общее свойство – высокая степень подверженности разрушительному воздействию внешних факторов. В частности, практически все формы опасных геологических

процессов и явлений, в том числе спровоцированные изменением климата, протекают в геологической среде со значительно большей скоростью, чем в естественных массивах горных пород. Результатом является опасная для городской застройки деформация и разрушения зданий, а также транспортных коммуникаций [28]. При достижении определенных масштабов подобные явления могут стать причиной возникновения ЧС. Наглядным примером может служить разрушение экологически опасных объектов на участках деградирующей многолетней мерзлоты [29]. По этой причине при создании адаптивных городов, подстилающую их геологическую среду следует априорно рассматривать как критическую климатическую уязвимость. Для уточнения этого вопроса необходима организация инженерно-геологического мониторинга.

Заключение

Глобальное потепление во многих регионах планеты вызывает изменение условий окружающей среды, при которых исторически сложившаяся жизнедеятельность населения сталкивается с серьезными затруднениями, а в ряде случаев становится невозможной. Одновременно возникают многоплановые проблемы в области обеспечения экологической безопасности. Кроме этого, изменение климата нередко сопровождается активизацией опасных геологических процессов и явлений, создающих угрозу для жизни людей, а также наносящих значительный экономический и экологический ущерб. По этой причине разработка адаптационных климатических проектов должна включать проведение дополнительных инженерно-геологических изысканий, в цели которых входит актуализация ранее полученных данных. Опасность и масштабы подобных событий позволяют рассматривать их как вид катастрофических событий – климатогенных чрезвычайных ситуаций. Эффективным способом снижения рисков и минимизации наносимых подобными событиями ущербов является разработка и реализация различных типов адаптационных климатических проектов. Их основными целями являются создание комфортной среды обитания для населения в новых климатических условиях, снижение рисков для здоровья и жизни людей и обеспечение экологической безопасности. Отдельного внимания заслуживают сопряженные решения, при которых результаты одного климатического проекта могут использоваться при выполнении другого. В качестве примера рассматривается отведение избыточных паводковых вод, вызывающих катастрофические наводнения, в те регионы, которые испытывают их дефицит. Создание необходимых для этого гидротехнических систем по межбассейновому перераспределению стока возможно на основе модификации уже существующих гидроэнергетических каскадов и воднотранспортных коммуникаций. Адаптационные климатические проекты всех типов следует рассматривать как реализацию концепции устойчивого развития. Они также должны быть взаимно скорректированными с мерами по созданию «адаптивных городов».

Литература / References

1. Осипов В.И. Природные опасности и стратегические риски в мире и в России // Экология и жизнь. 2009. № 11–12 (96–97). С. 6–15. EDN:muxwph.
   Osipov V.I. Natural hazards and strategic risks – in the world and in Russia. Ecology and Life, 2009, no. 11–12(96–97), pp. 6–15. EDN:muxwph.
2. Schäfer M., Hase V., Mahl D., Krayss X. From “Climate Change” to ‘Climate Crisis’? Analyzing Changes in Global News Nomenclature from 1996 to 2021. Bergen Language and Linguistics Studies, 2023, vol. 13, no. 1. DOI:10.15845/bells.v13i1.398.
3. Бычкова О.В., Каганова Е.А. Фрейм климатической катастрофы: российские ученые и СМИ об изменениях климата // Мир России. 2025. Т. 34. № 2. С. 120–142. DOI:10.17323/1811-038X-2025-34-2-120-142.

Bychkova O.V., Kaganova E.A. The climate catastrophe frame: Russian scientists and the media on climate change. Universe of Russia, 2025, vol. 34, no. 2, pp. 120–142. DOI:10.17323/1811-038X-2025-34-2-120-142.

4. Суздалева А.Л. Климатические проекты: основные виды и их результативность // Вестник евразийской науки. 2023. Т. 15. № 1. Порядковый номер 20. EDN:oelgrl.
   Suzdaleva A.L. Climate actions: main types and their effectiveness. The Eurasian Scientific Journal, 2023, vol. 15, no. 1, art. 20.
5. Amorim-Maia A.T., Olazabal M. Beyond adjustment: A new paradigm for climate change adaptation in a complex world. Global Environmental Change, 2025, vol. 93, art. 103027. DOI:10.1016/j.gloenvcha.2025.103027.
6. Obiorah C.A., Ndubuisi O.G., Ali S.E., Aku U.T., Nesiama O., Agbakhamen C.O., Gumi S.A. Advanced Climate Change and Adaptation Strategies for a Sustainable Resilient Future. International Journal of Innovative Biochemistry and Microbiology Research, 2025, vol. 13, no. 2, pp. 13–26. DOI:10.5281/zenodo.15262334.
7. Разумов С.О. Иллюзия антропогенных климатических потеплений или последствия деградации вечной мерзлоты // Евразийский Союз Ученых (ЕСУ). 2015. №12(21). С. 7–10. EDN:voiyrz.
   Razumov S.O. The illusion of anthropogenic climate warming or the consequences of permafrost degradation. Eurasian Union of Scientists, 2015, no. 12(21), pp. 7–10. EDN: voiyrz.
8. Котляков В.М. О причинах и следствиях современных изменений климата // Солнечно-Земная физика. 2012. Вып. 21. С. 110–114. EDN:qyvdel.
   Kotlyakov V.M. On causes and effects of current climate changes. Solar-Terrestrial Physics, 2012, no. 21, pp. 110–114. EDN:qyvdel.
9. Шерстюков Б.Г. Глобальное потепление и его возможные причины // Гидрометеорология и экология. 2023. № 70. С. 7–37. EDN:uvnhgq.
   Sherstyukov B.G. Global warming and its possible causes. Hydrometeorology and ecology, 2023, no. 70, pp. 7–37. EDN:uvnhgq.
10. Singh U.S. Sea level rise is unprecedented in the recent past. Biophilia Insights, 2025, vol. 3, no. 1, art. e202531001. DOI:10.52679/bi.e20 2531001.
11. Буряк Л.В., Кукавская Е.А., Каленская О.П., Малых О.Ф., Бакшеева Е.О. Последствия лесных пожаров в южных и центральных районах Забайкальского края // Сибирский лесной журнал. 2016. № 6. С. 94–102. EDN:xsaruv.
    Buryak L.V., Kukavskaya E.A., Kalenskaya O.P., Malykh O.F., Baksheeva E.O. Effects of forest fires in southern and central areas of the Zabaykal region. Siberian Forest Journal, 2016, vol. 6, pp. 94–102. EDN:xsaruv.
12. Суздалева А.Л., Горюнова С.В. Экологические основы формирования международного рынка ресурсов пресной воды // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия экология и безопасность жизнедеятельности. 2014. № 4. С. 85–98. EDN:sykqqp.
    Suzdaleva A.L., Goryunova S.V. Ecological foundations of international fresh water resources market formation. RUDN Journal of Ecology and Life Safety, 2014, no. 4, pp. 85–98.
13. Суздалева А.Л., Сидоренко А.В. Периодические и хронические чрезвычайные ситуации, обусловленные глобальным потеплением // Естественные и технические науки. 2022. № 12(175). С. 359–360. EDN:dqbwmf.
    Suzdaleva A.L., Sidorenko A.V. Periodic and chronic global warming emergencies. Natural and Technical Sciences, 2022, no. 12(175), pp .359–360. EDN:dqbwmf.

14. Li X. Physical climate change exposure and firms' adaptation strategy. Strategic Management Journal, 2025, vol. 46, pp. 750–789. DOI: 10.1002/smj.3674.

15. Hultgren A., Carleton T., Delgado M., Gerge D.R., Greenstone M., Houser T., Hsiang S., Jina A., Kopp R.E., Malevich S.B., McCusker K.E., Mayer T., Nath I., Rising J., Rode A., Yuan J. Impacts of climate change on global agriculture accounting for adaptation. Nature, 2025, vol. 642, pp. 644–652. DOI: 10.1038/s41586-025-09085-w.

16. Taminskas J., Minkevičius V., Linkevičienė R., Mikulėnas V., Danielius S., Satkūnas J. Karst geohazard and climate change: observations and assumptions for prediction. Episodes, 2025, vol. 48, no. 2, pp. 151–162. DOI: 10.18814/epiiugs/2025/025005.

17. Тихонова Т.В. Экосистемные услуги: пути практического использования // Проблемы развития территории. 2019. № 1 (99). С. 25–39. EDN:ywtdxv.
Tikhonova T.V. Ecosystem services: ways of their practical application. Problems of Territory's Development, 2019, no. 1 (99), pp. 25–39. EDN:ywtdxv.

18. Безносов В.Н., Суздалева А.Л. Урбоклиматические проекты для предотвращения чрезвычайных ситуаций в водоснабжении мегаполисов // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2024. Т. 6. № 1. С. 35–51. DOI: 10.34753/HS.2024.6.1.35. EDN:habrdf.
Beznosov V.N., Suzdaleva A.L. Urbanization climate actions to prevent emergencies in the water supply of megacities. Hydrosphere. Hazard Processes and Phenomena, 2024, vol. 6, iss. 1, pp. 35–51. DOI: 10.34753/HS.2024.6.1.35. EDN:habrdf.

19. Федоров М.П., Суздалева А.Л. Гидротехническое строительство как основа устойчивого развития // Гидротехническое строительство. 2014. №11. С.27–30. EDN:talpwr.
Fedorov M.P., Suzdaleva A.L. Hydrotechnical construction as a basis for sustainable development. Hydrotechnical construction, 2014a, no. 11, pp. 27–30. EDN:talpwr.

20. Суздалева А.Л. Гидротехническое строительство при организации рынка ресурсов пресной воды // Гидротехническое строительство. 2015. № 9. С. 48–54. EDN:uzmkij.
Suzdaleva A.L. Hydrotechnical construction in the organization of the fresh water resources market. Hydrotechnical construction, 2015, no. 9, pp. 48–54. EDN:uzmkij.

21. Суздалева А.Л. Водноресурсная логистика: международные аспекты // Мировая экономика и международные отношения. 2017. Т. 61. № 11. С.5–12. EDN:ztlyaf.
Suzdaleva A.L. Water resources logistics: international dimension. World Economy and International Relations, 2017, vol. 61, no. 11, pp. 5–12. EDN:ztlyaf.

22. Shumilova O., Tockner K., Thieme M., Koska A., Zarfl C. Global Water Transfer Megaprojects: A Potential Solution for the Water-Food-Energy Nexus? Frontiers in Environmental Science, 2018, vol. 6. art. 150. DOI: 10.3389/fenvs.2018.00150.

23. Liu C. Impact of Global Warming on China's Agricultural Production. ESAT 2022, E3S Web of Conferences, vol. 352. art. 03024. DOI: 10.1051/e3sconf/202235203024.

24. Федоров М.П., Суздалева А.Л. Экологическая оптимизация гидроэнергетики как альтернативная стратегия охраны окружающей среды // Гидротехническое строительство. 2014. № 3. С. 10–15. EDN:rzcyzb.
Fedorov M.P., Suzdaleva A.L. Ecological optimization of hydropower as an alternative strategy for environmental protection. Hydrotechnical construction, 2014, no. 3, pp. 10–15. EDN:rzcyzb.

25. Liu P, Chen P, Song X, Feng X and Zhang C. Editorial: Evolution mechanism and prevention technology of karst geological engineering disasters. Front. Earth Sci., 2026, vol. 13, art. 1768763. DOI:10.3389/feart.2025.1768763.

26. Wang Z., Tan Y., Lu X. Twenty Years of Resilient City Research: Reviews and Perspectives. Sustainability, 2024, vol. 16, art. 11211. DOI:10.3390/su16241121.

27. Сергеев Е.М. Инженерная геология – наука о геологической среде // Инженерная геология. 1979. № 1. С.1–9.
Sergeev E.M. Engineering geology – the science of the geological environment. Engineering Geology, 1979, no. 1, pp.1–9.

28. Смирнов И.Н., Мамина Д.Х., Суздалева А.Л., Медведев В.Т., Безносов В.Н. Форсайт экологической безопасности трансформации геологической среды урбанизированных территорий // Естественные и технические науки. 2025. №5(204). С. 253–256. EDN:babeia.
Smirnov I.N., Mamina D.Kh., Suzdaleva A.L., Medvedev V.T., Beznosov V.N. Foresight of ecological safety of transformation geological environment of urbanized areas. Natural and Technical Sciences, 2025, no. 5(204), pp. 253–256. EDN:babeia.

29. Безносов В.Н., Суздалева А.Л., Алборов И.Д., Цховребов Э.С., Филиппова О.П. Лолаев А.Б. Проблемы экологической безопасности техногенных объектов в условиях деградации многолетней мерзлоты // Вестник евразийской науки. 2024. Т.16. №2. Порядковый номер 70. EDN:dozbxw.
Beznosov V.N.1, Suzdaleva A.L., Alborov I.D., Tshovrebov E.S., Filippova O.P., Lolaev A.B. Problems of ecological safety of anthropogenic objects in the conditions of permafrost degradation. The Eurasian Scientific Journal, 2024, vol. 16, no. 2, art. 70. EDN:dozbxw.

Поступила в редакцию / Received 05.06.2026
Принята к публикации / Accepted 25.06.2026

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Безносов Виктор Николаевич, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, ООО НПО «Гидротехпроект»; г. Санкт-Петербург, Россия; профессор, Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, г. Москва, Россия; РИНЦ ID: 70722, Scopus: 6602408849, ORCID: 0000-0002-5878-0252; e-mail: BeznosovVN@yandex.ru.

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

Вязкова Ольга Евгеньевна, доктор геолого-минералогических наук, профессор, Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, г. Москва, Россия; РИНЦ ID: 184816, ORCID: 0000-0003-0927-3606; e-mail: wjask@yandex.ru

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

Суздалева Антонина Львовна, доктор биологических наук, профессор, профессор кафедры инженерной экологии и охраны труда; Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (НИУ МЭИ), г. Москва, Россия; профессор, Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе; г. Москва, Россия; РИНЦ ID: 70718, Scopus: 6507201491, ORCID: 0000-0001-7673-1967, WoS ResearcherID: ABF-2562-2020; e-mail: SuzdalevaAL@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Viktor N. Beznosov, D.Sc. (Biology), Chief science officer; NPO "Gidrotechproekt", Saint-Petersburg, Russian, Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia; ID RISC: 70722, Scopus: 6602408849, ORCID: 0000-0002-5878-0252; e-mail: BeznosovVN@yandex.ru.

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

Olga E. Vyazkova, D.Sc. (Geol.-Min), Professor, Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia; ID RISC: 184816, ORCID: 0000-0003-0927-3606; e-mail: wjask@yandex.ru.

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

Antonina L. Suzdaleva, D.Sc. (Biology), Professor, Professor of the Department of Engineering Ecology and Labor Protection; National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (MPEI), Moscow, Russia, Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia; ID RISC: 70718, WoS ResearcherID: ABF-2562-2020; Scopus: 6507201491, ORCID: 0000-0001-7673-1967; SuzdalevaAL@yandex.ru.

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

Научная статья / Scientific paper
УДК: 504.05
DOI: 10.34753/HS.2026.8.1.60

Формирования и развития оползневых процессов на территории г. Москвы

Е. А. Крахина, В. Н. Экзарьян
Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ), г. Москва, Россия
e-mail: l.k98@mail.ru

Аннотация. Анализируются факторы и условия развития склоновых процессов на территории Москвы, подверженной оползневым деформациям. Особое внимание уделяется комплексному анализу геологических, гидрологических и геоморфологических факторов, определяющих динамику и характер развития оползневых явлений. На основе детального изучения природных условий исследуемых районов Москвы выявлены специфические особенности проявления оползневых процессов. Целью работы являлось выделение и систематизация факторов, обусловливающих деформационные процессы на 13 оползневых участках Москвы. Объектом исследования являлись оползни Москвы, предметом – изучение факторов и условий, оказывающих воздействие на активность оползневых процессов. Анализ особенностей и характеристик оползневых участков, результаты экспертной оценки позволили систематизировать группы факторов естественного и техногенного характеров.

Ключевые слова: оползневые участки; геологическое строение; оползни Москвы; факторы и условия.
Для цитирования: Крахина Е. А., Экзарьян В. Н. Формирования и развития оползневых процессов на территории г. Москвы // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2026. Т. 8. Вып. 1. С. 60–73. DOI: 10.34753/HS.2026.8.1.60.

Formation and Development of Landslide Processes in Moscow

Elena A. Krakhina, Vladimir N. Ekzaryan
Sergo Ordzhonikidze Russian State Geological Exploration University, Moscow, Russia
e-mail: l.k98@mail.ru

Abstract. The factors and conditions of the development of slope processes in the territory of Moscow, which is subject to landslide deformations, are analyzed. Special attention is paid to the complex analysis of geological, hydrological and geomorphological factors that determine the dynamics and nature of the development of landslide phenomena. Based on a detailed study of the natural conditions of the studied areas of Moscow, specific features of the manifestation of landslide processes have been identified. The aim of the work was to identify and systematize the factors responsible for deformation processes in 13 landslide sites in Moscow. The study focuses on the landslides of Moscow specifically examining factors and conditions affecting the activity of landslide processes. The analysis of the features and characteristics of landslide sites, the results of an expert assessment allowed us to systematize groups of natural and anthropogenic factors.

Keywords: landslide sites; geological structure; landslides in Moscow; factors and conditions.
For citation: Krakhina E.A., Ekzaryan V.N. Formation and Development of Landslide Processes in Moscow. Hydrosphere. Hazard processes and phenomena, 2026, vol. 8, iss. 1, pp. 60–73. DOI: 10.34753/HS. 2026.8.1.60. (In Russian; abstract in English).

Введение

Формирование оползневых склонов в г. Москве представляет собой сложный процесс, обусловленный взаимодействием геологических, гидрологических и геоморфологических факторов. Под влиянием подмыва берегового уступа рекой Москва при его достаточной высоте (не менее 17–25 м над уровнем реки в межень) и наличии верхнеюрских глинистых пород в основании уступа, формируются первичные оползни сдвига-срезания с поверхностью смещения близкой к кругло-цилиндрической. Постепенный размыв «языковой» части этих оползневых тел обусловливает медленное продолжение «постосновного» смещения горных пород вниз по склону. При определенном положении запрокинутой поверхности головной части оползней изменения напряжений оказываются достаточными для нарушения равновесия прилегающего массива горных пород, который, в свою очередь, также отчленяется за счет сдвига-срезания по поверхности, близкой к кругло-цилиндрической в нисходящей части. В остальной части смещение происходит уже по зоне сдвига первоначального блока. Далее процесс происходит циклически, преимущественно развиваясь в сторону «плато», хотя имеют место и оползневые смещения в толще уже отчлененных блоков. Наибольшее количество блоков и максимальная длина (по направлению смещения) оползневого массива достигается на наиболее высоких склонах. Горизонтальные смещения оползневого массива при этом не значительны. Изменения напряженного состояния массива горных пород, приводящие к нарушению устойчивости последующих блоков, возникают вследствие разгрузки горизонтальных напряжений как из-за вышеуказанных малых горизонтальных смещений, так и вследствие опускания головных частей предыдущих блоков, уменьшающего вертикальные напряжения на поверхности смещения на этих участках. На качественном уровне влияние малых горизонтальных смещений на напряжения в массиве пород можно проиллюстрировать следующим примером.

Максимальная величина выпора дна котлована глубиной 15–20 м в средних грунтовых условиях не превышает 20 см, т.е. составляет 1–1,3 % от мощности вынимаемого грунта. Хотя грунт из котлована вынимается полностью, фактически для достижения того же результата достаточно его «приподнять» (переместить вверх) всего на 20 см, что обеспечивает полную разгрузку напряжений, (исключив при этом «виртуальном подъеме» передачу боковых напряжений). Следовательно, для последовательного формирования крупных оползневых блоков достаточно суммарного горизонтального смещения 1–2 м, хотя фактически эта величина все же в несколько раз больше, так как оползневые блоки при смещении не теряют контакта с остальным массивом и продолжают передавать достаточно большие напряжения на него. Таким образом, создаются условия для возобновления деформаций ползучести в оползневом массиве. По достижению их критических величин склон приобретает предельное состояние по устойчивости.

Весьма вероятно, что катализатором основного смещения с образованием новых блоков являются экстремальные паводки на реках, которые ведут к росту порового давления в зоне смещения, особенно на участке затопленного «языка» оползня. Быстрый спад паводка опережает диссипацию порового давления в глинистых грунтах и, кроме того, приводит к резкому росту гидравлических градиентов в языковой части массива, что увеличивает так называемое гидродинамическое давление. Когда влияние разгрузки прибровочной части массива вследствие незначительного смещения языковой части оползневого тела не может распространиться далеко вглубь массива за бровку, это приводит к формированию лишь узкого субблока. Это, видимо, является одной из причин того, что реальная поверхность смещения развивается в массиве вблизи бровки склона.

Методы

На оползневых участках г. Москвы отмечается дополнительное техногенное воздействие в результате проведения дноуглубительных работ в русле Москвы-реки,

которое приводит к нарушению устойчивости склонов. Кроме того, в 1980 и 1981 гг. осуществлялись работы по промывке русла реки, которые могли привести к эффекту, аналогичному активизации процесса донной эрозии. Скорости смещения массивов на оползневых участках г. Москва сейчас не выше, чем в 1960–70-х гг., но на ряде участков (Карамышевская набережная, Серебряный бор, Воробьевы горы и др.) в последние 10–15 лет появились поверхностные проявления в виде отдельных трещин разрыва, что может говорить о возможном переходе процесса в другую стадию. Данные режимных наблюдений за поверхностными реперами и инклинометрических исследований также показывают заметное изменение деформаций:

1. В Коломенском на участке Чертановских коллекторов и на участке Хорошево-1 наблюдается перемещение оползневых блоков по уже существующей зоне смещения;

2. На Воробьевых горах пока преобладает перекашивание и формоизменение массива.

На основе анализа таксономических признаков оползней из классификаций, разработанных такими отечественными учеными в областях инженерной геологии, геоморфологии и грунтоведения, как М. К. Рзаева [1], Г. П. Постоев [2], И. В. Попов [3], Г. С. Золотарев [4, 5], Ф. П. Саваренский [6], Н. В. Родионов [7], А. П. Павлов [8], Н. Н. Маслов [9], В. В. Кюнтцель [10, 11, 12] и Е.П. Емельянова [13, 14], К.А. Гулакян [10], А.И. Шеко [15] был выделен ряд ключевых факторов и условий, обуславливающих оползневые процессы на территории города Москвы.

По каждому участку рассмотрены факторы, способствующие развитию оползневых деформаций и провоцирующие смещение горных пород. Выделенные факторы на основе метода экспертной оценки [16] дополнительно были классифицированы по типу и характеру воздействия на состояние оползневого склона. На основе результатов экспертной оценки [16], факторы были распределены на три группы, в зависимости от длительности воздействия на оползневой склон: постоянные, медленно изменяющиеся и быстро изменяющиеся. Каждая группа подразделялась на классы по характеру происхождения условий: геологические, геоморфологические, гидрогеологические, биологические, почвенные, метеорологические, гидрологические, инженерно-геологические и техногенные.

На территории города Москвы выделяется 13 оползневых участков, для каждого определялись факторы и условия, обуславливающие оползневые, деформационные процессы.

Результаты

Оползневой участок Тушино расположен на левом берегу реки Сходни. Высота склона составляет около 17 м., крутизна 45°. Протяженность оползня вдоль берегового склона составляет 575 м, форма в плане фронтальная и прослеживаются остатки характерного бугристо-грядового рельефа. Четко прослеживается надоползневой уступ высотой около 10 м, крутизной 60°. Нижняя часть склона представляет собой прислоненную пойменную террасу шириной до 100 м. Береговой уступ укреплен от размыва бетонными плитами.

На основе скважин Мосгоргеотреста было составлено геологическое описание участка. На плато прослеживается горизонтальное залегание палеозой-мезозойских отложений: кровля каменноугольных известняков на отметках 109 м, оксфордских глин 122 м, волжских глин 132–133 м, волжских песков около 140 м.

Оползневой участок Щукино расположен на левом берегу реки Москвы, имеет протяженность вдоль берегового склона 500 м, прослеживаются остатки характерного бугристо-грядового рельефа (рисунок 1). Кровля каменноугольных отложений залегает на отметке 110–112,5 м, кровля оксфордских глин на плато залегает на отметке 122,5 м. Мощность четвертичных отложений 10–20 м.



Рисунок 1. Оползневой склон на участке Щукин
Figure 1. Landslide slope at the Shchukin site

Оползневой участок Серебряный бор расположен на правом берегу реки Москвы, в юго-западной части одноименной излучины. Участок имеет протяженность вдоль берегового склона около 1200 м и подразделяется на 3 оползневых амфитеатра, разделенных двумя большими оврагами. Участок характеризуется естественным бугристо-грядовым рельефом поверхности. В нижнем по течению реки амфитеатре на уступе второй оползневой ступени расположена трещина протяженностью 50 м. Склон интенсивно подмывается рекой, о чем свидетельствует крутой обнаженный береговой уступ.

Верхняя часть склона до глубины 20–21 м сложена песчано-глинистыми четвертичными отложениями и юрскими песками. Кровля юрских глин располагается на отметке 127,5 м, на 2 м выше уреза воды в реке. Кровля каменноугольных отложений вскрыта на отметках 102 м. По течению реки Москвы в средней и нижней частях участка отмечается нарушенное залегание пород – не прослеживается горизонтальное залегание слоев с равными сопротивлениями, а выделяются отдельные блоки, в пределах которых идентичные по свойствам и генезису горные породы располагаются на разных абсолютных отметках как по сравнению с плато, так и по отношению друг к другу.

Оползневой участок Хорошево-1 расположен на левом берегу реки Москвы между Хорошевским и Карамышевским спрямлением реки, протяженность участка около 1400 м, ширина достигает 120 м. Участок характеризуется отдельными оползневыми буграми. Склон подмывается рекой. На небольшом по протяженности участке, где расположены Карамышевские шлюзы, береговой уступ укреплен бетонными плитами и деревянными сваями.

Скважина, расположенная на расстоянии 500 м от центральной части оползневого участка, пройденная Солнечногорской гидрогеологической партией Гидрорежимной экспедиции Мингео РСФСР в 1976 г., позволила выявить расположение юрских и каменноугольных пород в коренном склоне. Кровля оксфордских глин располагается у уреза на абсолютных отметках 125 м, кровля каменноугольных отложений расположена на отметках 97,5 м.

Оползневой участок Фили-Кунцево расположен на правом склоне долины реки Москвы, в пределах Филевской излучины. Данный оползневой участок является одним из наиболее крупных, протяженность вдоль склона составляет около 3750 м, длина по оси смещения 220 м. Оползнем охвачен склон высотой порядка 47 м, крутизна в центральной части – 20°. По большей части поверхности оползня, исключая

краевые зоны, прослеживается до 3 оползневых ступеней. Оползневой уступ четко выражен и имеет высоту 35 м, крутизну 25°. В настоящее время активные проявления глубоких оползневых деформаций на участке Фили-Кунцево не наблюдается. Многочисленные оплывины, развивающиеся на надоползневом уступе, и достигают в отдельных случаях 130 м в ширину и связанны с местными особенностями геоморфологических, геолого-литологических и гидрогеологических условий.

На плато комплекс оксфордских глин залегает в интервале абсолютных отметок 117–106,5 м. Ниже залегают глины келловейского яруса мощностью 6,5 м и песчано-глинистые континентальные отложения бат-келловейского возраста мощностью 4–6 м. На теле оползня, отметки залегания кровли оксфордских глин колеблются от 110 до 120 м, что связано с блоковым строением оползня. Минимальные отметки оксфордских глин наблюдаются в средней части оползневой террасы, а в языке оползня – валообразное поднятие глин.

Оползневой участок Мневники расположен на левом берегу реки Москвы у Карамышевского шлюза [17], протяженность участка 480 м, ширина 70 м, также хорошо прослеживаются 2–3 оползневые ступени. По данным Мосгоргеотреста на плато кровля глин волжского яруса вскрывается на абсолютных отметках 134,5 м, кровля оксфордских глин на отметке в 131,5 м, а в береговом уступе на отметках 121,5–125,5 м отмечены выходы как оксфордских, так и волжских глин, что характеризует нарушение строения участка оползневыми процессами.

Оползневой участок Хорошево-2 расположен на левом берегу реки Москвы, непосредственно ниже по течению от Карамышевского гидроузла, протяженность участка вдоль склона составляет около 660 м, ширина до 57 м. До устройства набережной на участке отмечались проявления на поверхности глубоких деформаций в виде трещин и срывов в средней и верхней частях склона и на надоползневом уступе. В настоящее время подобные деформации отсутствуют. Высота и крутизна надоползневого уступа изменены вследствие отсыпок техногенного материала (строительного и хозяйственно-бытового мусора).

На участке Хорошево-II техногенная нагрузка представляет собой основную причину формирования оползневого массива. Активизация произошла в результате его пригрузки насыпными грунтами. На отдельных участках (район бывшего Студеного оврага) оползневой массив состоит из насыпных грунтов на 66 % [18].

Оползневой участок Поклонная гора расположен на правом берегу реки Москвы в центральной части города. Протяженность участка вдоль склона – 550 м, ширина около 120 м. На участке были произведены берегоукрепительные противооползневые мероприятия: отсыпка контрбанкета, возведение стенок набережной, планировочные работы, дренирование склона. Последствием планировочных работ является отсутствие четко выраженного оползневого рельефа.

Каменноугольные отложения имеют абсолютные отметки кровли в пределах 115–120 м с повышением к руслу реки Москвы. Характер размыва рельефа кровли известняков объясняется близостью оползневого участка к доюрской долине размыва, проходящей севернее. На данном участке отмечается существенное изменение положения кровли юрских глин и их мощностей на склоне, по сравнению с плато, в отличие от участка Хорошево-1. Верхний оползневой блок сместился в вертикальном направлении, а залегающие ниже блоки – запрокинуты.

Оползневой участок Воробьевы горы располагается на правом берегу реки Москвы, протяженность участка составляет около 3500 м, максимальная ширина 360 м. (рисунок 2). В рельефе четко прослеживаются 3–4 оползневые ступени. На участке были проведены противооползневые мероприятия: отсыпан контрбанкет, построена стенка набережной, произведено дренирование склона и небольшая планировка нижней части склона.



Рисунок 2. Оползни глубокого залегания на участке Воробьевы горы
Figure 2. Deep-seated landslides at the Vorobyovy Gory site

Кровля каменноугольных отложений прослеживается на плато практически на одних и тех же отметках 77–80 м. Кровля юрских глин на плато располагается на отметках 84–115 м. Выше залегает мощная, преимущественно песчаная толща юрских, меловых и четвертичных отложений. На склоне отмечается горизонтальное залегание смещенных горных пород в виде нескольких отдельных блоков. В языковых частях блоков, особенно в самом нижнем, отмечается возрастание мощности оксфордских глин, а в тыловой части этого блока мощность оксфордских глин уменьшена на 5 м (почти в 4 раза по сравнению с плато).

В районе Метромоста вблизи набережной на трех участках зафиксированы резкие локальные понижения кровли известняков и в некоторых случаях, отложения келловейского яруса. Углы наклона поверхности келловейских отложений, связанные с локальным рельефом, по словам Кропоткина М.П., не превышают нескольких градусов при преобладающей крутизне 1–3°, однако автор считает, что такие углы ненамного меньше углов внутреннего трения в наиболее слабых горизонтах юрских глин [19].

Воробьевы горы, как и Хорошево-1, Фили-Кунцево, где наблюдались аналогичные черты в строении оползневого склона, характеризуются залеганием известняков ниже уреза реки Москвы. В профиле в нижней части оксфордских глин ориентировочно выделена зона максимальных деформаций, имеющая мощность 5–10 м, а в языковой части до 20 м.



Рисунок 3. Оползневые ступени на участке Коломенское
Figure 3. Landslide benches at the Kolomenskoye site

Оползневой участок Коломенское располагается на правом берегу реки Москвы, протяженность участка составляет 3000 м, максимальная ширина 265 м. В отличие от двух других крупных оползневых участков – Воробьевы горы и Фили-Кунцево, Коломенское представляет собой три оползневых амфитеатра, разделенных участками склона, незатронутого глубокими оползнями (рисунок 3). Протяженность амфитеатров, расположенных вниз по течению реки Москва, составляет: первого – 250 м, второго – 300 м, третьего – 650 м. В пределах амфитеатров наблюдается типичный оползневой бугристо-грядовый рельеф (рисунок 4). Проведены противооползневые и берегоукрепительные работы – отсыпка банкета, возведение стенки набережной, дренирование склона и его благоустройство.

Каменноугольные отложения вскрываются на абсолютных отметках 90–97 м. Залегающая выше толща юрских глин и песчано-глинистая толща юрской, меловой и четвертичной систем имеет существенные различия в положении и мощностях на плато и склоне. Амплитуда изменения абсолютных отметок кровли и мощности глин оксфордского яруса очень значительные до 18 м, соответственно. Амплитуда изменения кровли волжских глин достигает 23 м, максимальное уменьшение мощностей составляет 6 м. В пределах среднего и нижнего течения реки Москвы оползневые склоны характеризуются наличием амфитеатров, где в одном случае келловейские отложения подверглись оползневым деформациям, что проявляется в изменении их положения и мощности, а в другом – они залегают горизонтально. В остальном наблюдается сходство в строении оползневых склонов на Воробьевых горах, Фили-Кунцево и Хорошево-2. На перечисленных участках (отлично от участка Поклонная гора), в языковой части наблюдается увеличение мощности глин, особенно в нижней части склона, а в тыловой части блоков уменьшение мощностей оксфордских глин.



Рисунок 4. Бугристо-грядовый рельеф участка Коломенское
Figure 4. Hummock-and-ridge topography at the Kolomenskoye site

К оползневым склонам участка Коломенское в пределах среднего и верхнего по течению реки амфитеатров прислонены террасы, поэтому активизации глубоких деформаций не наблюдается.

Оползневой участок Москворечье расположен на правом берегу реки Москвы, ниже железнодорожного моста Курского направления (рисунок 5). Протяженность оползневого участка составляет 400 м, ширина 65 м. Наблюдается два рядом расположенных амфитеатра. Нижняя часть склона в пределах амфитеатров и между ними имеет четко выраженный бугристо-грядовый рельеф. Средняя и верхняя части склона в пределах амфитеатров – срезаны.

По данным бурения каменноугольные отложения вскрыты на отметках 85–90 м, юрские глины – на 122–124 м. Меловые пески вскрыты на отметках значительно более низких, чем на плато, что может рассматриваться как одно из подтверждений оползневого строения склона.



Рисунок 5. Оползневой амфитеатр на участке Москворечье
Figure 5. Landslide amphitheater at the Moskvorechye site

Оползневой участок Сабурово располагается на правом берегу реки Москвы, протяженность участка 400 м. (рисунок 6). Рельеф склона не характеризуется типичными чертами – наличием гряд и бугров, участок представляет собой две террасовидные ступени.



Рисунок 6. Оползневой склон вблизи реки Москвы на участке Сабурово
Figure 6. Landslide slope near the Moskva River at the Saburovo site



Рисунок 7. Укрепление оползневых ступеней на участке Сабурово
Figure 7. Stabilization of landslide benches at the Saburovo site

На плато залегает толща пород оксфордских глин. В пределах нижней части склона, так же как на других участках, залегают горные породы с пониженным сопротивлением. Четких блоков пород, с запрокидыванием в сторону коренного склона, как это наблюдалось в других участках, здесь не выявлено, что может быть обусловлено небольшой шириной оползневого склона. На участке проведено укрепление оползневых ступеней (рисунок 7).

Оползневой участок Чагино располагается на левом берегу реки Москвы, протяженность участка около 600 м, ширина 56 м. К оползневому склону прислонена пойменная терраса, поверхность склона представлена слабовыраженным бугристо-грядовый рельефом.

Выявлены нарушения строения оползневого склона, связанные с юрскими глинами. Кровля юрских глин на плато располагается на отметках 120–121 м, на склоне в пределах верхнего блока на отметках 120–121 м, на нижнем 110–112 м. В нижнем блоке также часто прослеживаются запрокинутое положение смещенной толщи четвертичных отложений. В связи с наличием прислоненной к склону пойменной террасы активизация глубоких деформаций в естественных условиях невозможна.

В таблице 1 представлены данные по оползневым участкам Москвы, с указанием характеристики факторов, обуславливающих деформационные процессы.

Обсуждение

Оползневые участки, расположенные на территории г. Москва, характеризуются различными факторами и условиями, среди которых преобладают геологические, связанные с нарушением залегания пород и их физико-механическими свойствами. Также значимую роль играют гидрологические и техногенные факторы, особенно на участках, подверженных подмыву или испытывающих воздействие человеческой деятельности, такой как строительство и изменение рельефа. Большинство факторов являются постоянными или быстро изменяющимися, что указывает на необходимость перманентного ведения мониторинга оползневых процессов.

Таблица 1. Типизация факторов, определяющих степень активности оползневых процессов
Table 1. Typology of factors determining landslide process activity

№ оползне-вого участка	Наименование оползневого участка	Характеристика факторов, обуславливающих деформационные процессы	Класс фактора	Группа фактора
1	2	3	4	5
1	Тушино	Изменение положения кровли оксфордских глин на склоне (повышение ее по сравнению с плато на 2,5 м) – является признаком нарушенности залегания глин	Геологический	Постоянный
2	Щукино	Геолого-геоморфологические особенности	Геоморфологический	Постоянный
		Подрезка склона – нижней и средней частей склона	Техногенный	Быстро изменяющийся
		Оползневой уступ расчленен промоинами	Гидрогеологический	Медленно изменяющийся
		Процессы подмыва пород, слагающих берег рекой Москвой	Гидрологический	Быстро изменяющийся
3	Серебряный бор	Нарушение строения склона. Не прослеживается горизонтальное залегание слоев с равными сопротивлениям. Выделяются отдельные блоки, в пределах которых фрагменты пород с равными сопротивлениями, располагаются на разных абсолютных отметках (как по сравнению с плато, так и по отношению друг к другу)	Геологический	Постоянный
		Запрокинутое к плато залегание слоев	Геологический	Постоянный
		Оползневый уступ оголен, в виде отдельных ступеней выделяются просевшие участки. Бровка надоползневого уступа четко выражена, под бровкой тянется стенка срыва – вертикальная, обнаженная	Геоморфологический	Постоянный
		Ручей Гнилуша подрезает оползневой склон (песок выносится потоком и откладывается в русле р. Москвы образуя конус выноса)	Гидрологический	Быстро изменяющийся
		Подмыв берегового уступа рекой Москвой в пределах (крутой обнаженный береговой уступ) – боковая эрозия	Гидрологический	Быстро изменяющийся
4	Хорошево-1	Нарушенное горизонтальное залегание пород на склоне (наличие ряда блоков породы, в различной степени запрокинутости. Залегание в средней части склона толщи с резко пониженным сопротивлением – оксфордские глины)	Геологический	Постоянный
		В верхней части склона под территорией Храма Живоначальной Троицы и ТСЖ «Годуново» образовалась трещина закола, с захватом плато в районе хозяйственных строений церкви. Высота стенки срыва достигла 3 м. Оползневые деформации также фиксировались в средней и нижней частях склона	Геологический	Постоянный
		Склон подмывается рекой	Гидрологический	Быстро изменяющийся
5	Фили-Кунцево	Деформация глин оксфордского яруса (на плато комплекс оксфордских глин залегает в интервале абсолютных отметок 117,7–106,5 м. Кровля глин оксфордского яруса находится несколько ниже уреза реки – 120 м)	Геологический	Постоянный
		Значение угла внутреннего трения и сцепления в теле оползня колеблются в пределах 70–260 и 0,41–1,16 кг/см^2 (на плато угол внутреннего трения составляет 180–200, а удельное сцепление 0,65–0,82)	Геологический	Постоянный

1	2	3	4	5
5	Фили-Кунцево	На склоне формируются оплывины	Гидрологический	Быстро изменяющийся
		Эрозионный размыв берегового уступа	Гидрологический	Быстро изменяющийся
		Залегание юрских глин и каменноугольных известняков ниже уреза реки		
6	Мневники	Нарушенное строение пород на склоне (на плато кровля глин волжского яруса вскрывается на абсолютной отметке 134,5 м, кровля оксфордских глин на отметке 131,5 м. В береговом уступе на отметках 121,5–125,6 м отмечены выходы как оксфордских, так и волжских глин)	Геологический	Постоянный
		Стенка срыва оползня постоянно отступает, происходит откол от плато и сползание свежих блоков. За стенкой срыва наблюдается образование глубоких (до 2 м) и протяженных (30–50 м) трещин	Геоморфологический	Постоянный
		Специфический рельеф поверхности	Геоморфологический	Постоянный
		Подмыв склона рекой	Гидрологический	Быстро изменяющийся
7	Хорошево-2	Нарушенное залегание на склоне юрских глин и четвертичных пород (амплитуда колебания отметок кровли глин всех 3-х ярусов составляет 2–3 м, величина мощностей 1–1,5 м. За счет понижения кровли в каменноугольном периоде, в пределах нижнего блока наблюдается запрокинутое в сторону склона залегание юрских глин, а также уменьшение их общей мощности в тыловой части блока на 1,5 м. Кровля каменноугольных отложений здесь горизонтальна)	Геологический	Постоянный
		Ступенчатое изменение положения кровли пород с низким сопротивлением (оксфордские глины)	Геологический	Постоянный
		Залегание юрских глин и каменноугольных известняков ниже уреза реки	Гидрогеологический	Медленно изменяющийся
8	Поклонная гора	Существенное изменение положения кровли юрских глин и мощностей на склоне по сравнению с плато	Геологический	Постоянный
		На бровку склона насыпан грунт, на поверхности которого наблюдаются тонкие трещины закола. Бровка склона отгорожена бетонными плитами, часть которых наклонена и смещена	Антропогенный	Быстро изменяющийся
		Размыв и денудация выжимавшихся глин (берег реки Москвы подмывается, конец набережной разрушен)	Гидрологический	Быстро изменяющийся
9	Воробьевы горы	Оксфордские и волжские глины характеризуются большими колебаниями отметок кровли (на 13–16 м) и мощностей (особенно у оксфордских глин)	Геологический	Постоянный
		Горизонтальное залегание смещенных пород в верхнем блоке и запрокинутое в сторону коренного склона более старых блоков	Геологический	Постоянный
		Залегание юрских глин и каменноугольных известняков ниже уреза реки	Гидрогеологический	Медленно изменяющийся

1	2	3	4	5
10	Коломенское	Ослабление склона за счет строительных работ	Техногенный	Быстро изменяющийся
		Толща юрских глин, песчано-глинистые толщи юрских, меловых и четвертичных отложений имеют существенные различия в положении и мощностях на плато и склоне. Амплитуда изменения абсолютных отметок кровли и мощностей глин оксфордского яруса очень значительна – до 18–19 м. Амплитуда изменения кровли волжских глин достигает 23 м, а максимальное уменьшение мощностей – 6 м	Геологический	Постоянный
		Степень запрокинутости блоков увеличивается вниз по склону	Геологический	Постоянный
		В средней части склона отмечается интенсивный рост оврага	Геоморфологический	Постоянный
11	Москворечье	Средняя и верхняя части склона в пределах амфитеатров срезаны (сложенные песками). У бровки склона сделана новая насыпь и построены гаражи, что также оказывает негативное влияние на устойчивость склона	Техногенный	Быстро изменяющийся
		Вдоль бровки склона, в насыпных грунтах прослеживаются свежие трещины закола длиной 5 м	Геоморфологический	Постоянный
		Верхняя часть откоса неустойчива, на его поверхности множество стенок срыва с отколотыми блоками	Геологический	Постоянный
		Склон свободно подмывается рекой, что создает благоприятные условия для развития оползневых деформаций	Гидрологический	Быстро изменяющийся
		Меловые пески залегают на отметках склона значительно более низких, чем на плато	Геологический	Постоянный
12	Сабурово	Срезка в восточной части склона	Техногенный	Быстро изменяющийся
		Породы с пониженным сопротивлением около 8–10 Ом	Геологический	Постоянный
13	Чагино	Нарушенное залегание пород на склоне, связанное с юрскими глинами (кровля оксфордских глин на плато располагается на отметках 120–121 м. На склонах в пределах верхнего блока на отметках 120–121 м, на нижнем 110–112 м	Геологический	Постоянный
		В нижнем блоке также четко прослеживается запрокинутое положение смещенной толщи четвертичных отложений	Геологический	Постоянный
		Часть участка подмывается рекой. В нижней части склона вскрыты юрские глины, происходит оплывание грунта	Гидрологический	Быстро изменяющийся

Отмечаются следующие особенности строения оползневых склонов, основанные на анализе факторов и условий, воздействующих на прочностные и деформационные характеристики горных пород:

1. Отчленившийся от плато новый блок испытывает преимущественно вертикальные деформации (положение верхних блоков на участках Хорошево-2, Поклонная гора, Воробьевы горы, Коломенское). Запрокидывание положения породы характерно для блоков, расположенных ниже по склону, причем в этом направлении степень запрокинутости увеличивается.

2. На ряде участков (Воробьевы горы, Коломенское, в районе расположения Чертановских коллекторов) оползневыми деформациями не захвачены келловейские глины. Такие участки отличаются более глубоким залеганием этих отложений.

3. В блоках, расположенных в средней и особенно в нижней частях склона, наблюдается резкие изменения мощности глин (уменьшение в тыловой части, увеличение в языковой) – на Хорошево-2, на Воробьевых горах, в Коломенском. На участке Поклонная гора, где подошва юрских глин располагается у уреза, такого явления не отмечается, что объясняется подмывом и денудацией «выжимаемых» пород.

В качестве ключевых факторов, способствующих развитию оползней, выделяются три группы: постоянные, быстроизменяющиеся и медленно изменяющиеся. В группе постоянных факторов – нарушения залегания породы, трещины и особенности горизонтального или запрокинутого залегания слоёв. Группа быстро изменяющихся факторов включает: подрезку склонов, подмыв поверхностными водотоками, насыпь грунта. В группу медленно изменяющихся факторов входят: залегание юрских глин и каменноугольных известняков ниже уреза реки, расчленение оползневого уступа промоинами.

Геологические характеристики оползневых участков Москвы варьируются в широком диапазоне, включая высоту и крутизну склонов, типы залегания пород, наличие бугристо-грядового рельефа и другие параметры. Основные геологические особенности данных участков включают:

- наклонное залегание юрских песчано-глинистых отложений, что способствует ослаблению устойчивости склонов;
- формирование оползневых амфитеатров и ступеней, свидетельствующих о длительном развитии оползневых процессов;
- вертикальные деформации блоков, являющиеся индикаторами значительных перемещений грунтовых масс.

Для предотвращения развития оползней и минимизации их последствий необходимо проведение регулярных геотехнических исследований, включающих анализ инженерно-геологических условий, оценку устойчивости склонов и прогнозирование возможных оползневых процессов. На основе полученных данных следует разрабатывать и внедрять эффективные меры по укреплению склонов, устройству и контролю за техногенной деятельностью в районах с высоким риском оползней. Важно также осуществлять мониторинг состояния оползневых участков и оперативно реагировать на изменения, способствующие развитию опасных процессов.

Литература / References

1. Рзаева, М.К. Об инженерно-геологических типах оползней // Инженерные изыскания для строительства, 1969. Сер. 2. № 1. С. 79–86.
2. Постоев Г.П. Основные характеристики и признаки проявлений оползней // Геоэкология. 2010. № 2. С. 140–148. EDN: MDWWPF
3. Попов И.В. Инженерная геология. М.: МГУ, 1952, 512 с.
4. Золотарев Г.С. Инженерная геодинамика. Москва: МГУ, 1983, 328 с.
5. Золотарев Г.С. Методика инженерно-геологических исследований. М.: Изд-во МГУ, 1990, 384 с.

6. Саваренский Ф.П. Опыт построения классификации оползней // Труды I Всесоюзного оползневого совещания. Л.; Москва: ОНТИ, 1935. С. 29–37.
7. Родионов Н.В. К вопросу о классификации оползневых явлений. // Труды Московского геологоразведочного института, 1939, т. 15. С. 197–205.
8. Павлов, А.П. Оползни Симбирского и Саратовского Поволжья. М.: Университетская типография, 1903, 69 с.
9. Маслов, Н.Н. Основы инженерной геологии и механики грунтов. М.: Высшая школа, 1982 г., 511 с.
10. Гулакян К.А., Кюнтцель В.В. О распознании типов оползневых процессов // Доклады советских ученых к Международному конгрессу МАИГ. Москва: Всероссийский институт научной и технической информации Российской академии наук, 1970. С. 190–200.
11. Кюнтцель В.В. Закономерности оползневого процесса на Европейской территории СССР. М.: Недра 1980, 213 с.
12. Кюнтцель В.В. О возрасте глубоких оползней Москвы и Подмосковья, связанных с юрскими глинистыми отложениями // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологический. 1965. Т. XI. № 3. С. 93–100.
13. Емельянова Е.П. Основные закономерности оползневых процессов. М.: Недра, 1972, 308 с.
14. Емельянова Е.П. О причинах и факторах оползневых процессов // В сборнике «Вопросы гидрогеологии и инженерной геологии. Москва. 1953. С 67–68.
15. Шеко А.И. Методологические основы мониторинга экзогенных геологических процессов в связи с охраной литосферы от их неблагоприятного воздействия. Оползни и сели // Сборник докладов международного семинара в Алма-Ате. Центр международных проектов, ГКНТ М,, 1982. С.13–17.
16. Крахина Е.А., Экзарьян В.Н. Особенности и оценка оползневой опасности на территории города Москвы // Науки о Земле и недропользование. 2025. Т. 48. № 1 (90). С. 77–87. DOI: 10.21285/2686-9993-2025-48-1-77-87, EDN: QLAIMO.
Krakhina E.A., Ekzaryan V.N. Features and assessment of landslide hazard in Moscow. Earth sciences and subsoil use. 2025, 48 (1), pp. 77–87. DOI: 10.21285/2686-9993-2025-48-1-77-87, EDN: QLAIMO.
17. Волков В.А., Тихонов А.В., Калинина А.В., Аммосов С.М. Изучение структуры активного блокового оползня на примере Карамышевской набережной р. Москва. // ГеоРиск. 2012. № 3. С. 8–13. EDN: PLRCIB.
Volkov V.A., Tikhonov A.V., Kalinina A.V., Ammosov S.M. Studying the structure of an active block landslide by the example of the karamyshevskaya embankment in Moscow. GeoRisk, 2012, no. 3, pp. 8–13. EDN: PLRCIB.
18. Новиков П.В., Зеркаль О.В. Аверин И.В. Особенности развития оползневых процессов на территории Карамышевской набережной (г. Москва). Часть 1. // Строение и современная динамика. Инженерная геология. Том XIX, №3, 2024. С. 36–50.
Novikov P.V., Zerkal O.V., Averin I.V. Features of the development of landslide processes on the Karamyshevskaya Embankment (Moscow). Part 1. Structure and modern dynamics. Engineering Geology World, Vol. XIX, No. 3, 2024, pp. 36–50.
19. Кропоткин М.П. Оценка оползневой угрозы для метромоста Воробьевых гор в Москве // Инженерная геология, № 3. 2016. С. 6–15.
Kropotkin M.P., Assessment of landslide threat to Vorobyovy Gory metro bridge in Moscow // Engineering Geology, no. 3, 2016, pp. 6–15.

Поступила в редакцию / Received 12.05.2026
Принята к публикации / Accepted 04.06.2026

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Крахина Елена Александровна, аспирант, Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе (МГРИ), г. Москва, Россия; ORCID: 0009-0001-8043-3740, SPIN-код: 4391-6744; e-mail: l.k98@mail.ru.

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Elena A. Krakhina, Postgraduate Student, Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia; SPIN-code: 4391-6744, ORCID: 0009-0001-8043-3740; e-mail: l.k98@mail.ru.

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

Научная статья / Scientific paper
УДК: 624.131
DOI: 10.34753/HS.2026.8.1.74

Природные и антропогенные факторы формирования наледей в пределах водосбора р. Чадан

Л. А. Строкова
Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия
e-mail: sla@tpu.ru

Аннотация. Актуальность изучения наледей заключается в том, что они оказывают большое влияние на инфраструктуру и могут приводить к существенному экономическому ущербу, представлять опасность для населения. Анализ факторов, обусловливающих развитие наледей, позволяет предсказывать и предотвращать негативные последствия, своевременно принимая меры для их устранения. Целью данного исследования является выявление факторов, обусловливающих развитие наледей в пределах водосбора р. Чадан по спутниковым данным. Сбор, систематизация и анализ данных дистанционных съемок, результатов инженерных изысканий, имеющихся территориальных геологических, гидрологических, гидрогеологических сведений. Оконтурено 27 крупных и средних наледей, общей площадью 0,483 кв.км. Рассмотрены следующие факторы, влияющие на формирование наледного стока: изменения климата, морфометрические характеристики рельефа (высота местности и уклон), растительный и снежный покровы, типы землепользования и земного покрова, геологические особенности. Использование геоинформационных технологий позволило представить пространственные особенности компонентов геологической среды в едином цифровом формате. Наледи локализуются в двух зонах. В первой зоне наледи встречаются на границе среднегорных ландшафтов с древесным покровом, низкой радиационной температурой поверхности, большим количеством снега и степных низкогорных ландшафтов с небольшим снегонакоплением. Они приурочены к области распространения четвертичных отложений, с отметками поверхности 800–1000 м и уклонами до 2°, формируются за счет криогенного барража грунтовых вод аллювиальных отложений р. Чадан. Во второй зоне наледи приурочены к нижнедевонским отложениям с абсолютными отметками 1600–2100 м. К причинам наледного стока в декабре 2025 г. следует отнести: раннее промерзание почв и водотоков до дна в октябре, нарушение пропускной способности русла и мелиоративной сети и теплое начало зимы.

Ключевые слова: спутниковые снимки; наледи; индекс NDSI; индекс NDVI; водосбор р. Чадан.
Для цитирования: Строкова Л. А. Природные и антропогенные факторы формирования наледей в пределах водосбора р. Чадан // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2026. Т. 8. Вып. 1. С.74–86. DOI: 10.34753/HS.2026.8.1.74.

Natural and anthropogenic factors of icing within the Chadan River catchment

Ludmila A. Strokova
National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia
e-mail: sla@tpu.ru

Abstract. The relevance of studying icings lies in the fact that they have a great impact on infrastructure and can lead to significant economic damage and pose a danger to the population. The analysis of the factors contributing to the development of ice makes it possible to predict and prevent negative consequences by taking timely measures to eliminate them. The purpose of this study is to identify the factors contributing to the development of icing within the catchment area of the Chadan River. Collection, systematization and analysis of available territorial geological, hydrological, hydrogeological information, engineering survey results, remote sensing data. We contoured 27 large and medium-sized icings with a total area of 0.483 square kilometers. We considered the following factors affecting the formation of ice runoff: climate change, morphometric characteristics of the relief (elevation and slope), vegetation and snow cover, types of land use and land cover, geological features. The use of geoinformation

technologies has made it possible to present the spatial features of the components of the geological environment in a single digital format. Icings are localized in two zones. In the first zone, icings occur at the boundaries of intermediate landscapes with tree cover and abundant snow cover, and steppe-like lower landscapes with light snow accumulation. They are confined to the distribution area of Quaternary deposits, with surface elevations of 800-1000 m and slopes of up to 2°, a low surface radiation temperature, and are determined by cryogenic barrage of groundwater from alluvial deposits of the Chadan River. In the second zone, icings are confined to Lower Devonian deposits with absolute elevations of 1600–2100 m.

Keywords: satellite images; icing; NDSI index; NDVI index; Chadan River catchment.

For citation: Strokova L. A. Natural and Anthropogenic Factors of Icing Within the Chadan River Catchment. Hydrosphere. Hazard processes and phenomena, 2026, vol. 8, iss. 1, pp. 74–86. DOI: 10.34753/HS. 2026.8.1.74. (In Russian; abstract in English).

Введение

Наледи – это ледяные тела обычно плоско-выпуклой формы и различных размеров, формирующиеся зимой в результате многократного излияния подземных, речных, озерных или морских вод на поверхность земли или льда и послойного их замерзания [1]. В изучении наледей наметились разные теоретико-методологические подходы, среди них можно выделить методы оценки запасов подземных вод по наледным ресурсам О. Н. Толстихина, величины подземного стока Б. Л. Соколова, связь наледей с различными типами таликов Н. Н. Романовского, составление кадастров наледей для различных территорий и экспедиционные исследования В. Р. Алексеева, М. Л. Маркова, О. М. Макарьевой, В. Н. Черных, использование спутниковых данных А. Н. Шиховым, А. А. Землянсковой и др.

Наледи оказывают большое влияние на инженерные сооружения и могут приводить к потерям имущества, представлять угрозу жизни и здоровью населения. Отрицательное воздействие наледей проявляется в неожиданном затоплении территории и последующим замерзанием воды в условиях отрицательных температур воздуха, образовании ледовых плотин и барьеров, непредвиденных каналов стока; закупорка водопропускных труб и мостовых пролетов; формирование бугров и площадей пучения, пластов и линз подземного льда, термокарста и термоэрозии [2]. Известны случаи, когда взрывы наледных бугров пучения производили в течение нескольких секунд катастрофические нарушения, описанные в работе [3]. В Забайкалье, Саянах, Северо-Востоке России наледи наносят значительный ущерб инфраструктуре и объектам экономики [4–9]. Особо опасны наледи, которые выходят на дорогу или образуются под мостами, закупоривают водопропускные трубы. Ежегодное формирование – разрушение наледей приводит к износу мостовых опор. Часто весной наледный сток формируется раньше, чем вскрывается русло реки. Это явление регулярно отмечается на территории Магаданской области, когда талые наледные воды текут поверх речного льда, что приводит к подтоплению населенных пунктов, жилых домов и дорог [8]. Характерны наледи и для бассейна реки Чадан в Республике Тыва. Последний сток наледных вод наблюдался в конце декабря 2025 г. из-за перекрытия русла под мостами у села Бажын-Алаак, в некоторых районах г. Чадана (у школы №4 и Гортопа) вода залила придворовые участки 12 домов.

Целью данного исследования является выявление особенностей природных и техногенных факторов, обусловливающих развитие наледей в пределах водосбора р. Чадан по данным дистанционного зондирования Земли.

Насущность темы объясняется сравнительно слабой изученностью региона, негативным влиянием наледей на инфраструктуру, их ролью в стоке малых водотоков, а также практической ценностью для сельского хозяйства. Многочисленность факторов, влияющих на развитие наледей, таких как рельеф, температура воздуха, снежный покров, подстилающие горные породы, особенности речного и подземного стока, неполнота изученности их вклада, дискуссионность некоторых из них, также обусловливает актуальность их изучения.

Материалы и методы исследований

Исследование включало анализ фондовых материалов, полученных при обследовании противопаводковой дамбы в г. Чадан в 2020 г. В ходе изысканий были пробурено 8 скважин глубиной 2–4 м с отбором 8 проб грунта нарушенного сложения для определения гранулометрического состава [10]. На основании полевых наблюдений и лабораторных исследований в пределах площадки выделено два инженерно-геологических элемента: 1 – насыпной грунт (галечниковый грунт с песчаным заполнителем, tQIV) и 2 – галечниковый грунт с песчаным заполнителем 36 % (aQIV). Подземные воды при проходке скважин не встречены.

Анализ и обработка многоспектральных спутниковых снимков проведены в 2026 г. в отделении геологии ТПУ с привлечением сведений о геологическом строении участка.

Для анализа рельефа использовались данные SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) четыре смежных снимков (n50_e091_3arc_v1, n50_e092_3arc_v1, n51_e091_3arc_v1, n51_e092_3arc_v1). С помощью полученной цифровой модели были выделены уклоны поверхности, кривизны и экспозиции склонов.

Для изучения растительного и снежного покровов, а также радиационной температуры поверхности использовались космоснимки Landsat-8, обработанные на платформе Google Earth Engine (GEE). Для пространственно-временного анализа при работе с данными использовалась программа ArcGIS10.4.1.

Для характеристики геологического строения территории, экзогенных геологических процессов и антропогенной нагрузки использовалась единая цифровая модель комплекта листа государственной геологической карты М-46 (Кызыл) масштаба 1:1000000.

Для решения задач проводимого исследования использовались метеоданные о температуре воздуха и осадках за период с 1966 по 2026 г.[1]

Природные условия района

В физико-географическом отношении район исследований находится в пределах Центрально-Тувинской котловины, в ее западной части (Хемчикской котловине). Хемчикская котловина располагается между Западным Саяном на севере и хребтами Западный Танну-Ола на юге, на западе ограничена Шапшальским хребтом, с востока – хребтом Адар-Даш, отрогом хребта Западный Танну-Ола. Котловина вытянута в восточно-северо-восточном направлении на 130 км при ширине от 25 до 40 км. Отметки днища котловины – от 600 до 800 м. Среднегорную часть области образуют хребет Западный Танну-Ола. Хребет длиной около 200 км, на западе его высота достигает 2800–3000 м. В древних ледниковых цирках по северному склону хребта располагаются обширные снежники-перелетки. К востоку высота хребта снижается до 2500–2200 м. Вершинная поверхность здесь уплощенная, покрытая каменистыми россыпями-курумами, с отдельными денудационными останцами относительной высотой до нескольких десятков метров.

Абсолютные отметки района исследований изменяются от 675 м (устье р. Чадан) до 2925 м. В гидрографическом отношении река Чадан относится к бассейну реки Хемчик, которая впадает в реку Енисей.

По степени гидрологической изученности район относится к недостаточно изученным территориям, т. к. регулярные наблюдения за уровенным режимом и стоком проводились на реке Чадана лишь в течение неполных 2-х лет (1951–1953 гг.) в 4-х км от устья. Сток учитывался не полностью, поскольку не принимался во внимание сток, забираемый на орошение. В мае 2003 г. в составе метеорологической станции Чадан был открыт гидрологический пост, который проводит наблюдения по программе гидрологического поста 2 разряда, т.е. пост является уровенным. Стоковые наблюдения не проводятся. Пост расположен в 20 км от устья, в 30 м ниже автодорожного моста по дороге на г. Ак-Довурак [11].

[1] Научно-прикладной справочник «Климат России». Электронный ресурс. Режим доступа: http://www.pogodaiklimat.ru/history/36087.htm (дата обращения 05.04.2026).

Река Чадан берет начало на северном склоне хребта Западный Танну-Ола. Приустьевой участок заболочен. Впадает в р. Хемчик по правому берегу, в 101 км от устья Хемчика.

На берегах реки стоит г. Чадан, а также селения Теве-Хая, Хайыракан, Бажын-Алаак, в урочище Чайлаг-Алаак расположен буддийский монастырь Устуу-Хурээ. В г. Чадан на реке возведена противопаводковая дамба, в 2024 г. выполнен капитальный ремонт дамбы. На объекте обустроили дренажный канал и установили водопропускную трубу, которая поможет отводить потоки во время паводка. Протяженность восстановленного сооружения превышает 3 км, ширина составляет 4,5 м. Запланированы берегоукрепительные работы на р. Хемчик у с. Баян-Тала. При наступлении паводка возникает угроза соединения р. Хемчик со старым руслом р. Чадан, что может повлечь затопление с. Баян-Тала. Процесс смещения русла р. Хемчик в сторону р. Чадан происходит интенсивно, так, в течение 5 лет произошло перемещение более чем на 100 м. Под угрозу попадают прилегающие угодья, пашни, пастбища, мост через р. Чадан и с. Баян-Тала.

Река Чадан принимает 13 притоков длиной более 10 км. Наиболее крупные притоки: р. Аныяк-Хондергей, р. Кара-Чадана, р. Кара-Суг, р. Эльдиг-Хем, р. Орук-Хем, р. Сайр-Хем. Бассейн реки в плане вытянут с юго-востока на северо-запад. Общая длина реки составляет 98 км, общая площадь водосбора 2671 км^2, средний уклон реки 12,7 промилле; средняя высота водосбора 1418 м; густота речной сети 0,36 км/км^2, в 1952 г. расход воды в 4,1 км от устья – 4,86 м^3/с [11].

В верхней части река Чадан течет по узкой долине между высоких гор, пойма в долине реки появляется на расстоянии 20–25 км от её истока. Горы покрыты хвойными лесами с преобладанием лиственницы, пойма – лиственными с преобладанием тополя, ивы. Русло реки сложено из гальки и валунов, ширина его в верхней части 5–10 м, у гидропоста 50–55 м. В черте города в межень ширина русла – 2–3 м, скорость течения около 0,74 м/с, глубина – 0,15–0,18 м; в период высоких вод ширина русла – 20–50 м, скорость течения – 3 м/с, глубина 1,5–3,0 м. Глубина и скорость потока изменяются при выпадении интенсивных осадков в виде дождя и мокрого снега. Дно русла сложено песчано-галечными отложениями, деформирующееся.

Гидрологический цикл района изысканий состоит из четырех фаз: весеннее половодье, дождевые паводки, летне-осенняя и зимняя межень. Река Чадан имеет смешанное питание, в котором преобладает дождевое. Во время половодья проходит до 30 % годового стока [10]. После прохождения весеннего половодья устанавливается летне-осенняя межень. Межень, как правило, часто прерывается дождевыми паводками. Меженный период длится с июля по сентябрь. В среднем на этот сезон приходится 1–2 % объема годового стока. Дождевые паводки отмечаются в любом месяце летне-осеннего периода. Большая часть годового стока (около 60–65 %) приходится на дождевые паводки, число их за сезон достигает 10–15. Модуль паводочного стока достигает 20–40 л/сек. км^2 и более. Подъемы и спады выражены резко: за 1–2 дня уровень повышается на 0,3–0,5 м, максимумы наблюдаются в июле-августе. Модуль среднего годового стока колеблется в пределах 1–2 л/сек. км^2, также мал и коэффициент стока (0,1–0,2). Летом в межпаводочные периоды сток несколько уменьшается, составляя в среднем 0,25–0,50 л/сек. км^2. Зимой расходы воды резко понижаются, в среднем на сезон приходится 1–2 % объема годового стока.

Результаты опроса местных жителей в ходе инженерных изысканий для реконструкции дамбы в 2020 г., показали, что подъем уровня воды р. Чадан происходит в период прохождения дождевых паводков и весеннего половодья, высота подъема уровня реки при прохождении пика составляет 1,5–1,7 м. Весеннее половодье на реке начинается в апреле и длится 10 дней. Вода заливает всю пойму. Так же, по словам местных жителей на реке Чадан наблюдается карчеход. Карчеход образуется в результате попадания в русло реки деревьев с корнями и кроной. Попадание деревьев происходит в результате подмыва берегов и естественного падения в водоток [10].

Ледовый режим начинается с появлением первых ледяных образований (заберегов, сала) в конце октября, ледостав обычно наступает в ноябре. При установлении ледостава уровень

поднимается 0,2–0,4 м, после чего в течение всей зимы идет плавное понижение. Средняя продолжительность 126–141 дней. Толщина льда зависит от суровости зимы и влияния местных факторов. Вскрытие происходит во второй половине апреля.

Климат района резко континентальный. Средняя годовая температура воздуха составляет 0,2 °С. Январь является наиболее холодным месяцем года, со средней суточной температурой воздуха -27,9 °С. Переход среднесуточной температуры через 0 °С происходит в третьей декаде апреля, однако ночные заморозки продолжаются до конца мая и часто возможны в начале июня.

Лето наступает в среднем в третьей декаде мая и продолжается 3–4 месяца [10]. Самый жаркий месяц – июль. Среднемесячная температура июля – 18,2 °С, максимальная – в отдельные годы достигает 39,5 °С. Наиболее теплый период года продолжается 76 дней (с 3 июня по 19 августа).

Температурный режим почв находится в тесной зависимости от их гранулометрического состава, степени увлажнения, а также от высоты и плотности снега. На возвышениях почва промерзает на глубину в 2–3 раза большую, чем в более заснеженных понижениях.

Зима продолжительная и холодная. Устойчивый снежный покров образуется в первой декаде ноября. Увеличение запасов снега происходит равномерно, в течение всей зимы до конца третьей декады марта. Глубина снежного покрова в долинно-степной части 10–15 см, в горах на высоте 1200–1500 м до 150 и более сантиметров. Разрушение устойчивого снежного покрова происходит в первой декаде апреля. Число дней со снежным покровом изменяется от 140 до 190 дней с увеличением высоты местности над уровнем моря [10].

В ***тектоническом*** плане район на северо-западе входит в Хемчикско-Систигхемскую структурно-фациальную зону Западно-Саянской каледонской складчатой системы, на юго-востоке относится к Тувинскому палеозойскому прогибу, разделяемых Шуйской зоной разломов [12].

Участок работ находится в сейсмоопасном районе. Сейсмичность по карте А комплекта карт ОСР-2015 равна 8 (в долинах рек Чадан, Хемчик) и 9 баллов (в верховьях р. Чадан).

В ***геологическом*** строении района принимают участие кембрийские, ордовикские силурийские, девонские, каменноугольные и четвертичные образования [12].

Кембрийские представлены серией эффузивно-осадочных образований. Здесь выделяются горизонты порфиритов, туфов, конгломератов, песчаников и известняков. Общая мощность кембрийских отложений достигает 2000 м.

Ордовикские, силурийские отложения в районе встречены в бассейнах рек Чадан и Хемчик и их притоков, представлены осадочными толщами, мощностью от 1,5 до 5,0 км.

Девонские отложения представлены песчаниками, сланцами, туфами и порфиритами. Породы окрашены преимущественно в красный цвет. Мощность их достигает от 1,2 до 1,5 км.

Осадконакопление в Туве закончилось в раннекаменноугольное время, когда установился континентальный режим, и лишь в центральных частях Тувинского прогиба в юрское время продолжалось образование лагунно-континентальных отложений. Днище котловины, длительное время, служившее областью аккумуляции, покрыто чехлом кайнозойских отложений мощностью до 150–200 м.

Четвертичные отложения развиты очень широко. Генетически они представлены аллювиальными и элювиально-делювиальными образованиями. Наиболее широко развиты аллювиальные отложения, слагающие современное русло, пойму и надпойменные террасы р. Чадан, представленные валунами и галькой метаморфических и изверженных пород. Элювиально-делювиальные отложения представлены крупнообломочным материалом с примесью песчано-глинистых грунтов. Они развиты по склонам и у подножий гор и имеют мощность от 1 до 10 метров.

Подземные воды

Данный район расположен в Саяно-Алтайской гидрогеологической складчатой области, в Тувинском адартезианском бассейне [12]. По условиям залегания и циркуляции в районе работ распространены 2 типа подземных

вод: поровые воды рыхлых четвертичных отложений и трещинные и пластово-трещинные воды коренных пород. Поровые воды приурочены к аллювиальным четвертичным отложениям, представленными песками, супесями, галечниковыми грунтами с валунами. Питание водоносного горизонта осуществляется инфильтрацией атмосферных осадков и речной воды (особенно за время паводков). Разгрузка осуществляется в русло реки. Воды четвертичных отложений пресные, по химическому составу –гидрокарбонатные с переменным катионным составом, умеренно-жесткие.

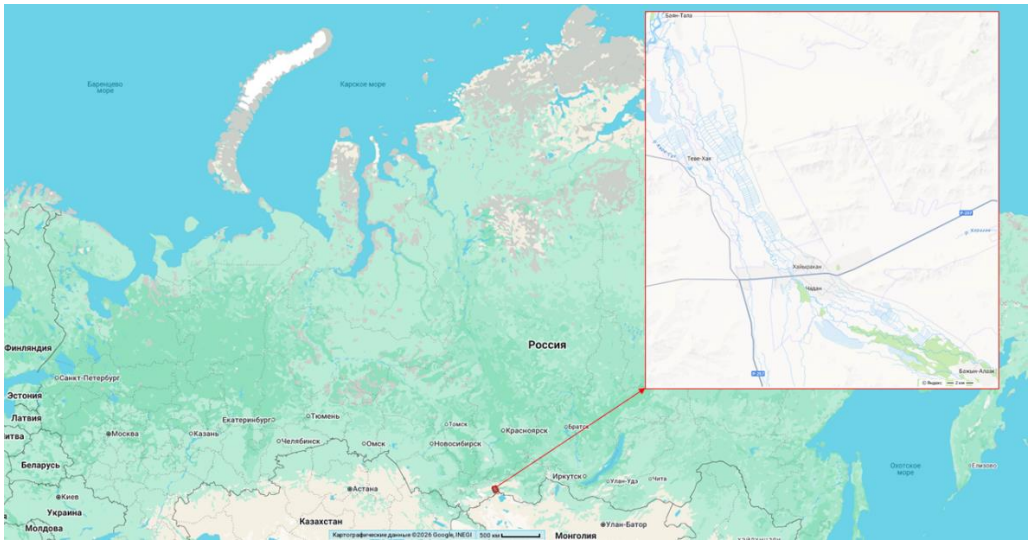


Рисунок 1. Местоположение водосбора р. Чадан, на карте-врезке - оросительная сеть в долине реки
Figure 1. The location of the Chadan River catchment area; the inset map shows the irrigation network in the river valley

Геологические процессы. На участке развиты: склоновые процессы, многолетнее мерзлые породы (ММП), высокая сейсмическая активность, изредка карст. По геокриологической карте листа М-46 по направлению с ЮЗ на СВ выделяются зоны: *сплошного* (мощностью до 300 м, температурой ММП от -1 до -8 °С), *прерывистого* (мощностью от 100 до 150 м, температурой ММП от 0 до -3 °С), и *островного* (мощностью до 50 м, температурой ММП от 0 до -1 °С) распространения многолетнемерзлых пород [12].

Техногенные условия

На территории проживает почти 15 тыс. человек. Земледелие в Хемчикской котловине тесно связано с организацией оросительной системы, заложенной еще в древности. Причем, по сведениям А. Д. Грача, орошались не только поля, но и луга [13]. Пуск воды в распределительные каналы и в мелкую поливную сеть регулировался посредством временных земляных перемычек. Существовала переложная система земледелия, когда участок пашни после трех-четырех лет использования исключался из оборота на долгий срок. В 1939 г. был сооружен Чаданский оросительный канал длиной 7 км. На протяжении 400 м канал проходил в скальных породах, глубина выемки достигала в некоторых местах 10 м.

Чаданская оросительная система имеет площадь 1253 га (рисунок 1). В последние годы в республике набирает темп работа по восстановлению мелиоративного комплекса к 2030 году. Требуется капитальный ремонт головных водозаборов и реконструкция магистральных и распределительных каналов, очистка земляных каналов от деревьев, кустарника и сорной растительности, которыми они затянуты, лотковые каналы также нуждаются в очистке и ремонте.

Результаты исследования и их обсуждение

Идентификация наледей. Оконтуривание наледей проводилось в ArcGIS в два этапа. На первом этапе в качестве критерия для выделения наледей использовалось наложение карт снежного индекса (*NDSI*>0,4 для льда/снега) и

вегетационного индекса (*NDVI*<0,1 для мест без растительности). Далее проводилась фильтрация полученного растра путем применения маски, которая представляет собой буферную зону шириной до 200 м, в пределах речной сети, установленной инструментом Hydrology ArcGIS, т.к. наледи локализованы в долинах рек. Выделено 18 наледей общей площадью 0,189 км^2. На втором этапе дополнительно оконтурены девять наледей с суммарной площадью 0,294 км^2 вручную по майским снимкам 2025 г. (рисунок 2а,б). Итого выделено 27 наледей с общей площадью 0,483 км^2. Согласно классификации наледей по их площади Н.И. Толстихина [14] в пределах водосбора р. Чадан оконтурено 1 очень крупная, 9 крупных и 17 средних наледей (рисунок 2 в).

а(a)



б(b)



в(c)



Рисунок 2. Наледи: а – у с.Бажын-Алаак; б – у г.Чадан в окне карты GEE; в – в проекте ArcGIS
Figure 2. Icings: a – near Bazhyn-Alaak; b – Chadan in the GEE map window; c – in the ArcGIS project

Климатический фактор распространения наледей. Для установления причин наледного стока в декабре 2025 г. необходимо рассмотреть гидрометеорологические показатели. Средняя месячная температура воздуха в октябре 2025 г. была ниже нормы на 0,9 °С, а в ноябре и декабре 2025 г. – выше нормы на 1,5 и 1,7 °С соответственно.

Изменения климата: за последние десятилетие наиболее суровые зимы зафиксированы в 2016 и 2022 гг. со значениями температуры ниже нормы на 3 и 2,5°С в октябре, 7 и 4°С ноябре, 2 и 7°С в декабре соответственно. Наиболее благоприятные погодные условия для глубокого сезонного промерзания горных пород, и соответственно, наледеобразования существовали в малоснежные и холодные зимы. Таковыми являлись 2016 и 2022 гг.

По нашим данным среднегодовая температура воздуха по данным метеостанции Чадан за период 1966–2025 гг., увеличилась на 2,5 °С (рисунок 3). В наибольшей степени потепление затронуло зимние и весенние месяцы года, в результате чего изменяются условия формирования весеннего половодья и режим деятельного слоя почвогрунтов.

Распределение осадков внутри года крайне неравномерное. Общее количество выпадающих за год осадков равняется 248 мм. Из них 206 мм выпадает в теплое время года и 37 мм в холодный период. Годовой пик осадков приходится на июль–август (66 мм), максимум твердых осадков выпадает в декабре (м/ст. Чадан). Оценки изменения осадков показали незначительный положительный вековой тренд.

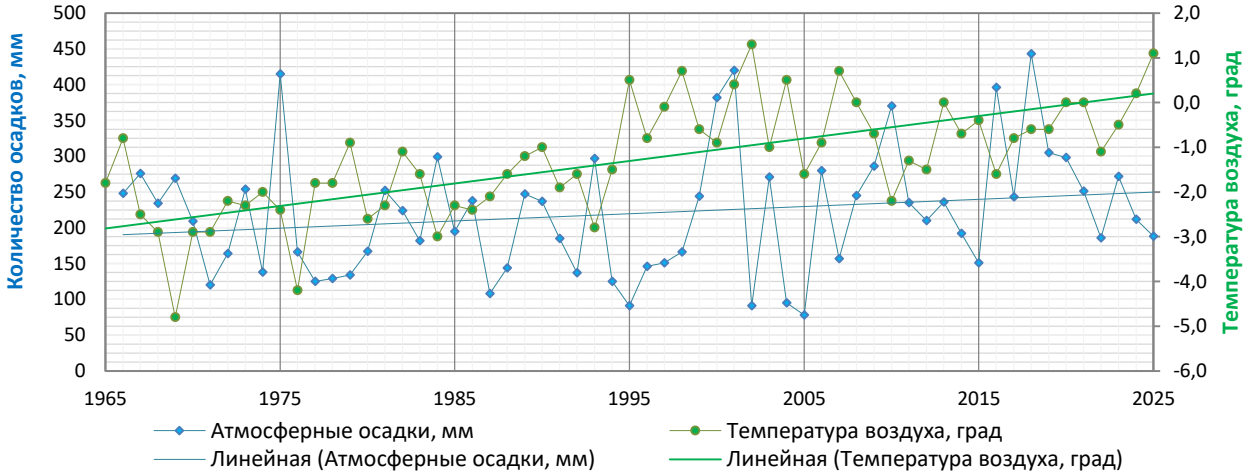


Рисунок 3. Среднегодовые значения параметров по метеостанции Чадан
Figure 3. Annual average values of the parameters for the Chadan weather station

Рельеф. Характер рельефа в активности геологических процессов криолитозоны занимает ведущее место. Экспозиция и крутизна склонов, высота над уровнем моря влияют на распределение поступающей солнечной радиации, температурный режим горных пород, распределение ландшафтов. Рельеф территории преимущественно низкогорный и среднегорный, а высокогорный ограниченно встречается в южной и **восточной частях** (рисунок 4а-г). В результате анализа полученных нами данных установлено, что наледи приурочены к поверхностям с уклонами до 2° и двум зонам по абсолютным отметкам: 800–1000 (9 наледей) и 1600–2100 м (16 наледей).

Анализ покровов (земного, растительного и снежного) был выполнен на платформе Google Earth Engine (GEE) – онлайн-сервис от компании Google с хранилищем геопространственных данных и инструментами их анализа и автоматизированной обработки в облачном сервисе[2].

[2] Earth Engine от Google – уникальная платформа для анализа больших геоданных [Электронный ресурс]. //URL: https://habr.com/ru/post/500020/. (дата обращения: 17.02.2026)

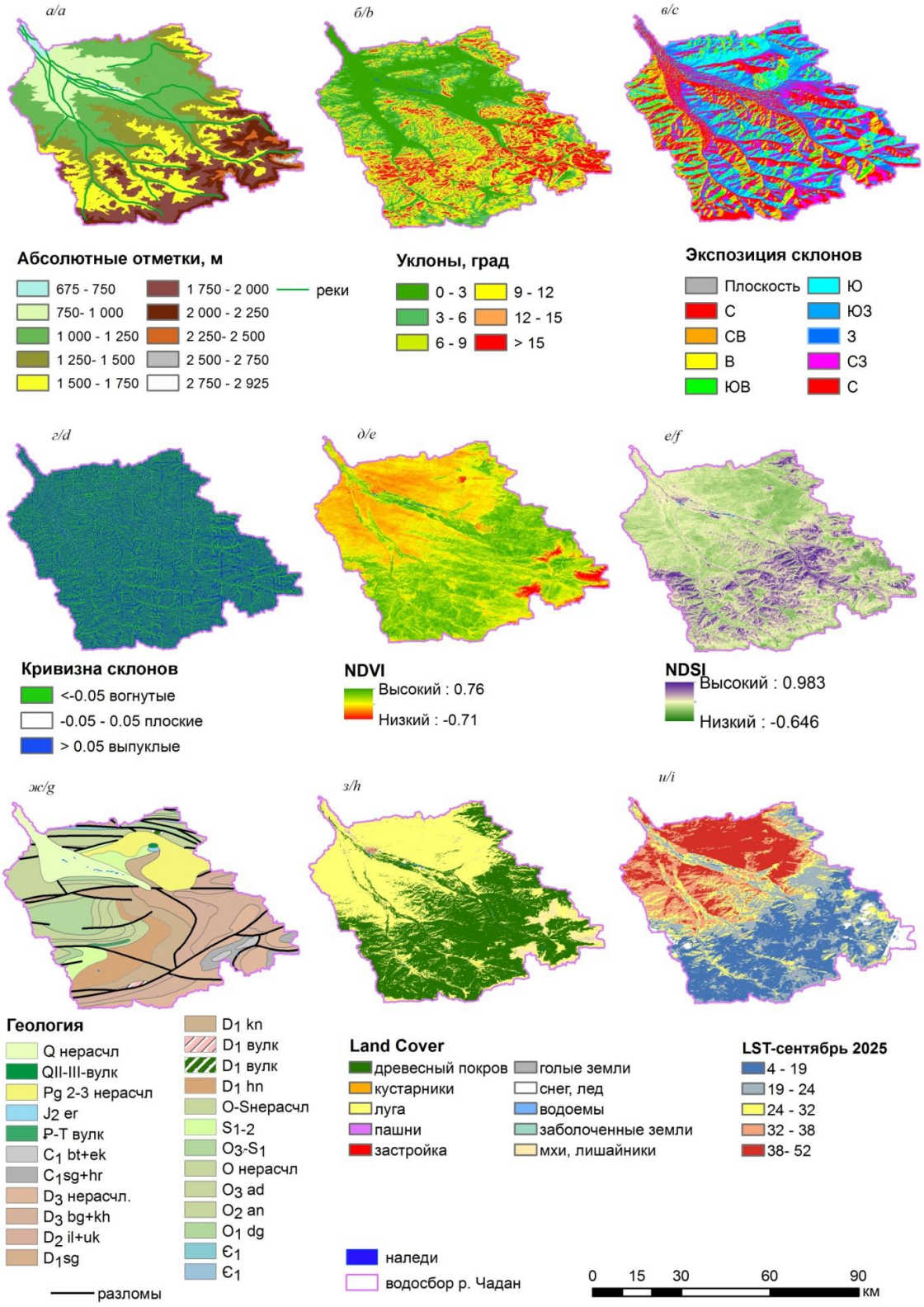


Рисунок 4. Факторы, определяющие формирование наледей: а) абсолютные отметки; б) уклоны; в) экспозиция склонов; г) кривизна склонов; д) растительный покров (NDVI); е) снежный покров (NDSI); ж) геология; з) использование земель (Land Cover); и) радиационная температура поверхности (LST, сентябрь 2025)

Figure 4. Factors determining the formation of icings: a) elevation; b) slope; c) aspect; d) curvature; e) NDVI; f) NDSI; g) geology; h) Land Cover; i) LST, September 2025

Растительный покров играет значительную роль в теплообмене земной поверхности с атмосферой, участвуя в поглощении радиации и встречном излучении [15–19]. При прочих равных условиях под любым растительным покровом температура почвы летом оказывается ниже, а глубина протаивания меньше, чем на участках, где растительность отсутствует. Но особенно сильно этот эффект проявляется под хвойной растительностью, когда накопление подстилки, состоящей из опада хвои мощностью 3–5 см, замедляет прогревание почвы [16].

Вегетационный индекс NDVI был определен по снимку LANDSAT/LC08/C02/T1_TOA/LC08_142024. Время снимка выбрано по рекомендациям [19], так в период со второй половины августа по первую половину сентября радиационная температура поверхности имеет взаимосвязь с температурой пород на подошве годовых теплооборотов, т.е. в указанный период в горных районах сезонно-талый слой достигает максимальных значений, а сезонно-мерзлый полностью оттаивает. А также, в этот период исключается маскирующее влияние активно вегетирующей растительности и аномальные температурные контрасты за счет солнечного нагрева будут минимальными. Был отобран снимок от 20.09.2024, т.е. поздней осенью до выпадения снега. Положительные значения (0,44) в *NDVI* показывают леса, кустарники (рисунок 4д), в то время как отрицательные значения (-0,25) соответствуют воде, (-0,5) – бетону, асфальту.

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED}, \quad (1)$$

где *NIR* – коэффициент спектральной яркости в ближней инфракрасной зоне, *RED* – в красной.

Результаты *NDVI* показывают, что территории, заросшие лесом, имеют более высокие значения (зеленый цвет), а более низкие значения соответствуют лугам, пастбищам (желтый цвет). Застроенные территории и голые земли (курумники в высокогорной части) обозначены красным цветом. Визуально наледи приурочены к зеленой зоне по индексу *NDVI*.

Земной покров (Land Cover). Для характеристики землепользования и земного покрова территории использован продукт ESA WorldCover 10m – глобальный набор данных о классах земного покрова для 2020 и 2021 гг. с разрешением 10 м. Получены на основе данных спутников Sentinel-1 и Sentinel-2. Выделено 10 типов земного покрова (рисунок 4з). На карте земного покрова наледи приурочены к голым землям, причем три наледи пересекают дороги.

Снежный покров. Влияние снежного покрова на глубину сезонного промерзания, температуру горных пород и наледеобразование рассмотрены в работах [1–9]. Отепляющий эффект снежного покрова растет с повышением его мощности и уменьшением плотности. На снегонакопление оказывает микрорельеф поверхности, а также лесной и кустарниковый ярусы растительного покрова.

Для изучения снежного покрова использован нормализованный разностный снежный индекс (*NDSI*):

$$NDSI = \frac{GREEN-SWIR_1}{GREEN+SWIR_1}, \quad (2)$$

где *GREEN* – коэффициент спектральной яркости в зеленой зоне спектра с длиной волны 0,525–0,600 мкм, $SWIR_1$ – в коротковолновой инфракрасной зоне с длиной волны 1,56–1,66 мкм.

Пиксели со значениями снежного индекса *NDSI* больше 0,4 принимаются за заснеженные не менее, чем на 50 % [2]. Расчет *NDSI* произведен на платформе GEE по снимку 28.05.2017 с нулевой облачностью. Максимальные значения индекса *NDSI* характерны для среднегорного пояса, минимальные для низкогорного (рисунок 4е). Снегонакопление в низкогорной части составляет в среднем 4–6 см, в среднегорной в среднем до 15 см и в высогорной более 20 см. Большая часть наледей приурочена к границам среднегорных зон с древесным покровом, большим количеством снега и низкогорных степных зон с небольшим снегонакоплением (с индексом *NDSI* от -0,2 до 0,6 – оттенки фиолетового цвета на карте).

Радиационная температура *(тепловое инфракрасное излучение поверхности, LST*) определялась на платформе GEE по средним

(медиана) сентябрьским снимкам с 2015 по 2025 гг., с использованием индекса *NDVI* и канала 10 Landsat 8 (рисунок 4и). В низовьях реки (до отметок 1250 м) температура составляет 30–40 °С, в среднегорной склоновой части, покрытой густой хвойной растительностью, температура значительно снижается и составляет часто 4–19 °С, голые высогорные территории со значительными уклонами лучше прогреваются и имеют температуры 24–32 °С. Все наледи приурочены к зонам с низкой температурой 19–24 °С.

Геологический фактор распространения наледей. Согласно составленной карте распространения наледей, основная часть крупных наледей приурочена к четвертичным отложениям низкогорья (рисунок 4ж) и формируется за счет криогенного барража грунтовых вод аллювиальных отложений р. Чадан. Наледи среднегорной зоны приурочены к нижнедевонским отложениям, две из них локализуются вдоль тектонических нарушений (разломов, трещин) и стратиграфических контактов, что косвенно подтверждает предположение о питании наледей за счет подземных вод. Наледи, образующиеся в таких местах, обычно имеют небольшие размеры. На некоторых притоках р. Чадан формируются наледи, которые можно отнести к наледям речных вод. Они наблюдаются на реках Улуг-Хондергей, Кара-Адыр, Бугалыг. Их формирование происходит при промерзании воды в руслах до дна на мелких участках и перекатах. На одном водотоке может быть несколько таких наледей (рисунок 2в). В их питании, вероятно, участвуют не только речные, но и подземные воды. В связи с этим вопрос определения принадлежности наледей к разным генетическим типам, в зависимости от источников питания, является сложным и нерешенным.

Техногенный фактор. Наличие дорог, разветвленной мелиоративной сети, безусловно, влияет на формирование наледей. Так мостовые конструкции у с. Бажын-Алаак спровоцировали формирование крупных наледей ниже по течению. Однако важно отметить, что для характеристики влияния техногенных факторов на образование наледей недостаточно только спутниковых данных, необходимы экспедиционные исследования.

К причинам наледного стока в декабре 2025 г. следует отнести: раннее промерзание почв и водотоков до дна в октябре, нарушение пропускной способности русла и мелиоративной сети, теплое начало зимы. Отсутствие или неполные ряды метеонаблюдений за стоком воды, снежным покровом осложняют составление моделей для прогнозирования наледного стока, что таит реальную угрозу безопасности инфраструктурным объектам.

Заключение

1. На основе спутниковых данных с помощью индексов *NDSI* и *NDVI* выделено 27 наледей суммарной площадью 0,483 км^2. Рассмотрены факторы, обусловливающие формирование наледей, а именно: климат, рельеф (высота местности и уклон), растительный и снежный покровы, характер и тип использования земель, состав горных пород.
2. Наледи локализуются на поверхностях с низкой радиационной температурой 19–24 °С (середина сентября) в двух зонах. В первой зоне наледи встречаются на границе среднегорных ландшафтов с древесным покровом, большим количеством снега и степных низкогорных ландшафтов с небольшим снегонакоплением. Они приурочены к области распространения четвертичных отложений, с отметками поверхности 800–1000 м и уклонами до 2°. Во второй зоне наледи приурочены к нижнедевонским отложениям с абсолютными отметками 1600–2100 м. Вопрос определения принадлежности наледей к разным генетическим типам, в зависимости от источников питания, на данный момент является нерешенным. Наличие дорог, разветвленной мелиоративной сети, безусловно, влияет на формирование наледей в этом районе. Для всестороннего изучения наледеобразования только спутниковых данных недостаточно, необходимы наземные наблюдения.
3. К причинам наледного стока в декабре 2025 г. следует отнести: раннее промерзание почв и водотоков до дна в октябре, нарушение пропускной способности русла и мелиоративной сети и теплое начало зимы.

Литература / References

1. Алексеев В. Р. Наледеведение: словарь-справочник. Новосибирск: Изд-во Сиб. отд-ния РАН, 2007, 429 с.
2. Гагарин Л. А., Баишев Н. Е., Мельников А. Е., Николаева Е. С. Применение радиолокационных космоснимков Sentinel-1 при картировании наледей Чульманского плато и оценка закономерностей их распространения. Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2024. Т. 29. №1. С.80–95. DOI:10.31242/2618-9712-2024-29-1-80-95.
   Gagarin L.A., Baishev N.E., Melnikov A.E., Nikolaeva E.S. Synthetic aperture radar Sentinel-1 for icing mapping of the Chulman Plateau and icing pattern assessment. Arctic and Subarctic Natural Resources. 2024, vol. 29, iss.1, pp. 80–95. (In Russian; abstract in English). DOI:10.31242/2618-9712-2024-29-1-80-95.
3. Васильчук Ю. К., Гинзбург А. П., Токарев И. В., Буданцева Н. А., Васильчук А. К., Паламарчук В. А., Блудушкина Л. Б., Слышкина Е. С. Морфология наледи Булуус, Улахан-Тарын, условия ее залегания и распределение стабильных изотопов кислорода и водорода в нижней части // Арктика и Антарктика. 2024. № 1. DOI:10.7256/2453-8922.2024.1.70079.
4. Алексеев В. Р. Подземные льды и гидротермическое движение грунтов на наледных участках речных долин // Лёд и Снег. 2015. № 1 (129). С.69–88. DOI: 10.15356/IS.2015.01.07.
   Alekseev V.R. Ground ice and hydrothermal ground motions on aufeis plots of river valleys. Ice and Snow. 2015, vol. 1, iss.129, pp.69–88. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.15356/IS.2015.01.07.
5. Менчук В. В., Кондратьев А. В. Источники гидрологических опасностей на территории Республики Бурятия // Вестник Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления. 2013. №. 6 (45). С. 221–226.
6. Рыбальченко С. В., Верховов К. В. Природные наледи селевых бассейнов среднего и южного Сахалина // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2021. №. 1. С. 24–41. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-1-2.
   Rybalchenko S. V., Verkhovov K. V. Natural Ice Mounds of the Middle and Southern Sakhalin Mudflow Basins // Water Sector of Russia. 2021. No. 1. P. 24–41. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-1-2.
7. Выркин В. Б., Шеховцов А. И., Белозерцева И. А., Алёшина И. Н., Захаров В. В., Кичигина Н. В., Черкашина А. А. Современное состояние ландшафтов Окинской котловины (Восточный Саян) // География и природные ресурсы. 2012. №. 4. С. 98–107.
8. Землянскова А. А., Шихов А. Н., Макарьева О. М., Никитина П. А. Закономерности распространения наледей подземных вод, их связь с формированием речного стока и опасных явлений в Магаданской области // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. №. 1. С. 57–75. DOI: 10.35567/19994508-2025-1-57-75.
   Zemlianskova A. A., Shikhov A. N., Makarieva O. M., Nikitina P. A. The patterns of spring aufeis distribution, their relation with river runoff formation and hazardous phenomena in the Magadan region. Water Sector of Russia: Problems, technologies, Management. 2025, iss. 1, pp. 57–75. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.35567/19994508-2025-1-57-75.
9. Черных В.Н. Распространение и динамика наледей в Селенгинском среднегорье. Известия Русского географического общества. 2024. Т. 156. №2. С.155–168. DOI: 10.31857/S0869607124020055.
   Chernykh V. N. Distribution and Dynamics of Icings in the Selenga Middle Mountains. Proceedings of the Russian Geographical Society. 2024, vol. 156, iss.2, pp.155–168. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.31857/S0869607124020055.
10. Технический отчет по инженерным изысканиям по объекту: «Капитальный ремонт защитной дамбы на р. Чадана в г. Чадан Дзун-Хемчикского кожууна» Республики Тыва. Кызыл: ООО «Тывагипрозем», 2020. 314 с.

11. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 16. Ангаро-Енисейский район. Выпуск 1. Енисей. – Л.: Гидрометеоиздат, 1973. 374 с.
12. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Ред. Блюман Б.А. Серия Алтае-Саянская. Лист M-46 – Кызыл. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2008. 349 с.
13. Прокофьева Е. Д. Процесс национальной консолидации тувинцев. СПб.: Наука, 2011. 538 с. [Электронный ресурс] // Онлайн библиотека: Проект Музея антропологии и этнографии (Кунсткамера). 2011. https://lib.kunstkamera.ru/files/lib/978-5-02-038280-0/978-5-02-038280-0.pdf (дата обращения: 20.03.2026).
14. Толстихин Н. И. Подземные воды мерзлой зоны литосферы. Л., М.: Госгеолиздат; 1941. 204 с.
15. Тематическое дешифрирование и интерпретация космических снимков среднего и высокого пространственного разрешения [Электронный ресурс]: учебное пособие / А. Н. Шихов, А. П. Герасимов, А. И. Пономарчук, Е. С. Перминова // Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2020. 191 с. URL: http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/shikhov-gerasimov-ponomarchuk-perminova-tematicheskoe-deshifrovanie-i-interpretaciya-kosmicheskih-snimkov.pdf. (дата обращения: 10.01.2026).
16. Гулый С. А., Скачков Ю. Б., Рожина М. С. Анализ причин продолжающегося формирования многолетней мерзлоты под хвойными лесами в условиях глобального потепления // Лесоведение. 2022. № 4. С. 419-431. DOI: 10.31857/S0024114822040039.
Gulyi S. A., Skachkov Yu. B., Rozhina M. S. Analysis of the causes of the ongoing formation of permafrost under coniferous forests in conditions of global warming // Forestry science. 2022, No. 4, pp. 419-431. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.31857/S0024114822040039.
17. Самбуу А. Д. География и ландшафты Тувы. Кызыл: Изд-во ТувГУ, 2018. 116 с.
18. Черноусенко Г. И. Засоленные почвы котловин юга Восточной Сибири. Москва: МАКС Пресс, 2022. 480 с. DOI:10.29003/m2657.978-5-317-06783-0.
19. Калиничева С. В. Методика выявления мерзлых и талых пород с использованием тепловых космических снимков в горных районах Южной Якутии. Дисс. … канд. геол.-мин. наук. – Якутск, 2019. 132с.
Kalinicheva S. V. Methodology for detecting frozen and thawed rocks using thermal satellite images in mountainous areas of South Yakutia. Ph.D (Geological and mineralogical sciences) Thesis]. Yakutsk, 2019. 132 p. (In Russian; abstract in English).

Поступила в редакцию / Received 22.02.2026
Принята к публикации / Accepted 19.05.2026

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Строкова Людмила Александровна, доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия; SPIN-code: 9050-1995, AuthorID: 144181, WoS ResearcherID: E-7332-2014, Scopus Author ID: 35073051700, ORCID: 0000-0001-9302-0630; e-mail: sla@tpu.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Ludmila A. Strokova, D. Sc. (Geology and Mineralogy), Professor, Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia; SPIN-code: 9050-1995, AuthorID: 144181, WoS ResearcherID: E-7332-2014, Scopus Author ID: 35073051700, ORCID: 0000-0001-9302-0630; e-mail: sla@tpu.ru.

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ
HYDROLOGICAL REGIME OF WATER OBJECTS

Научная статья / Scientific paper
УДК: 556.5
DOI: 10.34753/HS.2026.8.1.87

Гидрохимический режим малых водоёмов урбанизированных территорий (на примере прудов г. Самары)

О. Я. Червяцова[1], Д. С. Казадаев[2], Д. В. Киселёва[3], Т. Г. Окунева[3]
[1]Государственный природный биосферный заповедник «Шульган-Таш», Республика Башкортостан, Россия; [2]Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти, Россия;
[3]Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия
e-mail: kittary@yandex.ru

Аннотация. На территории городской застройки Самары сохранилось более 35 искусственных прудов, созданных в доурбанистический период (конец XIX – начало XX века). Изначально эти водоёмы обустраивались на базе существовавшей овражно-балочной сети малых водотоков для ирригационных целей на территориях бывших дач и совхозов. В настоящее время они представляют собой ценный рекреационный ресурс: на их основе организованы зелёные зоны и места отдыха, востребованные среди городского населения. Однако в результате включения в зону городской застройки водосборная площадь прудов сократилась, вследствие чего многие из них перешли в деградирующее состояние. Целью исследования являлась гидрохимическая и изотопная характеристика вод городских прудов города Самары в контексте региональных геологических и гидрогеологических условий. На основе полученного массива данных и применения ряда методов статистической обработки – включая классификацию по типам вод, кластеризацию, анализ данных методом главных компонент (PCA), расчёт ионных соотношений и другие подходы – были предприняты попытки диагностировать типы питания прудов и основные механизмы метаморфизации их вод. Выявлено, что для водоёмов, расположенных на водораздельной поверхности, преобладает подземный тип питания. Такие водоёмы достаточно уязвимы: их состояние может быстро деградировать при потере связи с водоносным горизонтом, например, в результате заполнения котловины донными осадками. Для водоёмов, размещённых на хорошо дренируемых склонах долин рек Волги и Самары, доминирует питание за счёт поверхностного стока. Основными факторами, обусловливающими гидрохимическое разнообразие прудов помимо типа питания, являются техногенное засоление, закисление, испарительное концентрирование, а также биологические процессы.

Ключевые слова: химический состав вод; городские водоёмы; пруды г. Самары.
Для цитирования: Червяцова О. Я., Казадаев Д. С., Киселёва Д. В., Окунева Т. Г. Гидрохимический режим малых водоёмов урбанизированных территорий (на примере прудов г. Самары) // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2026. Т. 8. Вып. 1. С. 87–110. DOI: 10.34753/HS.2026.8.1.87.

Hydrochemical Regime of Small Water Bodies in Urban Areas (Using Samara City Ponds as an Example)

Olga Y. Chervyatsova[1], Dmitry S. Kazadaev[2], Daria V. Kiseleva[3], Tatyana G. Okuneva[3]
[1]"Shulgan-Tash" State Natural Biosphere Reserve, Russia; [2]Togliatti State University, Togliatti, Russia;
[3]Academician A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia
e-mail: kittary@yandex.ru

Abstract. More than 35 artificial ponds created during the pre-urbanisation period (late 19th – early 20th century) have been preserved within Samara's urban area. These water bodies were originally developed based on the existing network of ravines and small watercourse channels for irrigation purposes on sites of former dachas and state gardens. Today, they represent valuable recreational resources, with green spaces and leisure areas established

around them that are in high demand among the urban population. However, their inclusion within the urban development zone has caused their catchment area to shrink, resulting in many of the ponds falling into disrepair. The study investigated the hydrochemical and isotopic properties of waters in urban ponds in Samara, considering regional geological and hydrogeological contexts. Using a range of statistical methods, including classification by water type, clustering and principal component analysis (PCA), as well as the calculation of ion ratios, the study aimed to identify the types of water recharge to the ponds and the main mechanisms of water transformation. It has been found that, for water bodies situated on a watershed, groundwater recharge is the predominant source of water recharge. These water bodies are highly vulnerable and can degrade rapidly if they lose contact with the aquifer, for instance if it fills with sediment. In contrast, for water bodies located on the well-drained slopes of the Volga and Samara River valleys, surface runoff is the dominant source of water. Apart from the type of water recharge, the main factors controlling the hydrogeochemical diversity of ponds are anthropogenic salinization, acidification, evaporative concentration and biological activity.

Keywords: chemical composition of water; urban water bodies; Samara city ponds.

For citation: Olga Y. Chervyatsova, Dmitry S. Kazadaev, Daria V. Kiseleva, Tatyana G. Okuneva. The Hydrochemical Regime of Small Water Bodies in Urban Areas (Using Samara City Ponds as an Example). Hydrosphere. Hazard processes and phenomena, 2026, vol. 8, iss. 1, pp. 87–110. DOI: 10.34753/HS. 2026.8.1.87. (In Russian; abstract in English).

Введение

Пруды и озёра играют важную роль в городском ландшафте, представляя разнообразные экосистемные услуги, такие как регуляция микроклимата, удержание фосфора и азота, поддержание биоразнообразия и др. Они являются ценным рекреационным ресурсом, имеют эстетическое и культурное значение.

Проблемы сохранения городских водоёмов часто связаны с потерей водосборной площади при застройке и прокладке коммуникаций. При этом, сокращение растительного покрова и обилие асфальтовых покрытий увеличивают скорость стока, способствуя развитию эрозии и накоплению донных осадков. В результате таких воздействий городские водоёмы часто деградируют.

На территории городской застройки г. Самары сохранилось более 35 прудов, созданных в доурбанистический период. Эти водоемы хорошо изучены в биотическом отношении [1–5], но сведения об их гидрологическом и гидрохимическом режиме носят фрагментарный характер [6–8]. Исключение составляет Нижний пруд Ботанического сада, где проводились комплексные исследования, позволившие выявить меромиктический характер этого водоёма [9]. Целью работы является генетическая интерпретация гидрохимических и изотопных данных (полученных в рамках настоящего проекта и опубликованных ранее) для выявления особенностей питания прудов – в частности, предполагавшегося ранее [9] участия подземных вод.

Район исследования

Геологические и гидрогеологические условия. Территория г. Самары находится в междуречье рек Волги и Самары. Воды этих рек находятся в подпоре Саратовского водохранилища с абсолютной отметкой уреза 28 м. Водораздельный массив (рисунок 1) представляет собой эрозионно-денудационное плато [10], сложенное отложениями уржумского яруса P_2ur [11] (ранее относившихся к татарскому ярусу P_2t [12, 13]). Эти отложения представлены глинами и алевролитами с прослоями мергелей, доломитов и песчаников [12, 13]. Водораздельные склоны сложены породами казанского яруса, подразделяющегося на два подъяруса: верхний P_2kz_2 (преимущественно терригенные породы с подчиненной ролью карбонатов) и нижний P_2kz_1 (преимущественно карбонатные породы). Во всех стратиграфических подразделениях могут локально встречаться прослои гипсов и ангидритов [14]. Коренные породы покрыты прерывистым чехлом рыхлых элювиально-делювиальных четвертичных отложений [10], мощность которых в некоторых местах достигает 30–40 м [15], а в восточной и северной части города – аллювиальными отложениями (QI-III) надпойменных террас рек Самары и Волги.

Основной региональный водоносный комплекс г. Самары приурочен к карбонатным породам P_2kz_1 [12]. Его пьезометрический уровень контролируется реками Волга и Самара и находится на отметках 31–37 м н.у.м. [16]. В районе исследования так же распространены пластово-поровые воды терригенных пород уржумского яруса [13] и локальные водоносные горизонты в четвертичном покрове над слабопроницаемыми разностями коренных пород [10, 15–17], которые наиболее важны в контексте данной работы.

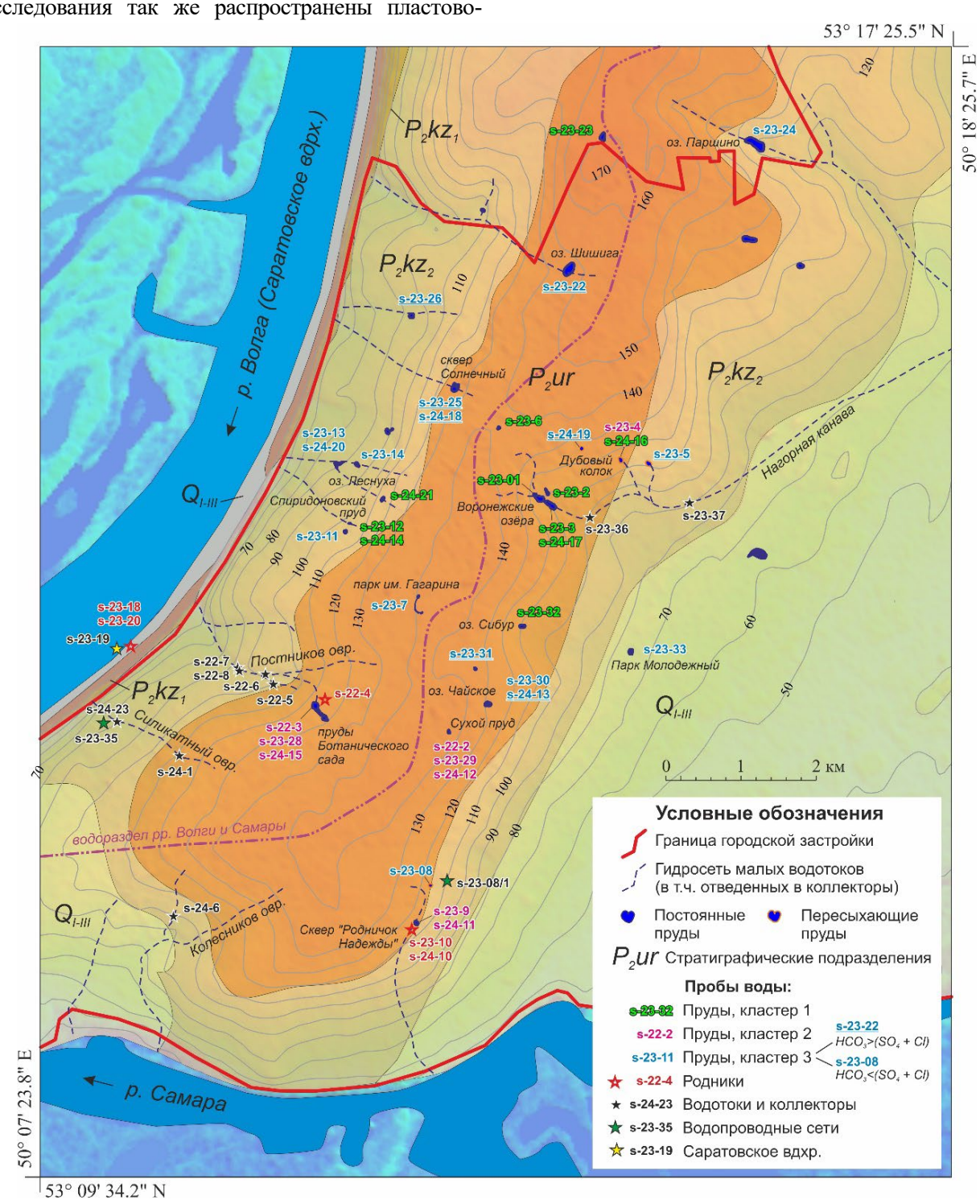


Рисунок 1. Карта-схема расположения изучаемых объектов и точек отбора проб, геологическая основа по [11, 13]

Figure 1. Schematic map showing the location of the study site and sampling points; geological framework based on [11, 13]

Гидроклиматический режим. Район г. Самары относится к лесостепной ландшафтно-климатической зоне. Климат умеренно-континентальный с жарким летом (Dfa по классификации Кеппена-Гайгера). Самым теплым месяцем является июль (21,9 °С), наиболее холодным – январь (-9,6 °С), норма осадков составляет 561 мм/год[1]. Величина потенциальной эвапотранспирации, оцененная методом Торнтвейта, составляет 507 мм/год. Для питания речных и подземных вод наиболее значимы превосходящие испаряемость осадки холодного времени года (с октября по апрель), сумма эффективных осадков которого составляет около 250 мм/год.

Пруды г. Самары: история создания и морфология. Большинство прудов созданы на базе существовавшей овражно-балочной сети малых водотоков, путем расширения русла и отсыпки перегораживающих земляных плотин. В основном, пруды создавались на территориях бывших дач и совхозов в ирригационных целях. Наиболее старые пруды созданы на рубеже 19–20-х веков (Ботанического сада, скверов Солнечный и Родник Надежды, Сибур, Чайский, Сухой и Спиридоновский). Часть прудов (Шишига, Паршино, в парке Гагарина и сквере Дубовый колок) созданы позже, между 1934 и 1970 гг. [4, 6, 7, 8, 9].

Большинство прудов имеют площадь 0,7–2,0 тыс. м^2 и глубину 0,5–2,0 м, некоторые могут пересыхать в конце лета (таблица 1, см. рисунок 1). К крупным (с площадью зеркала S = 22,2–5,4 тыс. м^2) и относительно глубоким (3,2–5,8 м) прудам относятся Паршино, Нижний пруд Ботанического сада, Воронежские озёра и пруд в сквере Солнечный. Так же выделяется ряд крупных (S = 7,6–13,5 тыс. м^2) и мелководных (<1,5 м) водоёмов (Чайский пруд, Шишига, Леснуха). Большинство прудов бессточные, разгрузка происходит путём фильтрации через плотины и испарение.

Материалы и методы

Отбор проб воды проводился в июле 2022 г., в августе 2023 и в сентябре 2024 г. Наиболее крупная серия водных проб 2023 г. анализировались по макро- и микрокомпонентному составу и стабильным изотопам. В пробах 2022 и 2024 г. (поверхностный сток, ключевые объекты для мониторинга и пересыхавшие в 2023 г. водоёмы) определялся только макрокомпонентый состав. Все пробы отобраны в прибрежной зоне прудов (с берега) из поверхностного (10–20 см) слоя воды.

Для оценки условий питания прудов наибольший интерес представляют подземные воды первого водоносного горизонта в породах P_2ur и/или в перекрывающих четвертичных отложениях (поскольку точно разделить эти типы вод невозможно, мы используем обозначение P_2ur-d,eQ). Они доступны в двух каптированных родниках на водораздельных склонах речных долин рек Волги и Самары (см. рисунок 1). Так же использованы ретроспективные данные по родникам г. Самары [17].

Для характеристики поверхностного стока г. Самары отобраны пробы воды из водотоков (в частности, отведенных в дренажно-ливневые коллекторы) оврагов Постнякова, Силикатного и Колесникова и ручья Нагорная канава (см. рисунок 1). Так же отбирались пробы воды р. Волги и из водопроводных сетей на изотопные анализы.

Параметры воды pH и T измерялись с помощью прибора «HANNA HI98195». Концентрации HCO_3^-, Ca^{2+}, общая жесткость, SO_4^{2-} и Cl^- определялись титриметрическими методами (ПНД Ф 14.1:2.245-07, РД 2.24.395–2017, ПНДФ 14.1:2.96-97, РД 52.24.406–2018), Na^++K^+ и Mg^{2+} – расчётным методом.

Для микроэлементного анализа пробы предварительно пропускались через фильтры 0,45 μm и подкислялись HNO_3, очищенной дважды перегонкой при температуре ниже температуры кипения в перегонных установках (Savillex, США; Berghof, Германия). Измерения проводились на квадрупольном ИСП-масс-спектрометре NexION 300S (PerkinElmer) в Институте геологии и геохимии УрО РАН (ЦКП Геоаналитик, г. Екатеринбург).

[1] Сайт Росгидромета https://meteoinfo.ru

Таблица 1. Марокомпонентный и изотопный составы воды прудов г. Самары
Table 1. Major ions and isotopic compositions of water from ponds in Samara

Код пробы	Объект	S м²/ $H_{макс}$ м[2]	pH	HCO_3^-, мг/л	Cl^-, мг/л	SO_4^{2-}, мг/л	Жест., ммоль/л	Ca^{2+}, мг/л	Mg^{2+}, мг/л	Na+K, мг/л	М., г/л	$\delta^{18}O$, V-SMOW	δ^2H, V-SMOW	Тип воды[3]	Кластер[4]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
s-23[1]-01	Воронежские озёра, верхнее	7514 / 2	7,08	433,1	110,4	42,2	9,6	100,2	57,0	34,2	0,78	-6,7	-65,7	$C\frac{Ca}{II}$	1
s-23-02	Воронежские озёра, среднее	2513 / 2,7	7,10	549,0	129,9	88,3	12,7	130,3	76,9	41,4	1,02	-7,3	-68,1	$C\frac{Ca}{II}$	1
s-23-03	Воронежские озёра, нижнее	7815 / 3,7	7,22	414,8	103,2	69,1	9,4	96,2	57,0	40,2	0,78	-7,4	-69,7	$C\frac{Ca}{II}$	1
s-24-17			7,03	396,5	110,4	69,1	10,0	104,2	59,5	24,1	0,76			$C\frac{Ca}{II}$	1
s-23-04	Сквер Дубовый колок	1968 / < 1,5	6,56	91,5	393,4	126,7	4,5	76,2	8,7	246,8	0,94	-6,4	-65,3	$Cl\frac{Na}{III}$	2
s-24-16			7,50	274,5	231,4	76,8	9,4	78,2	68,2	74,1	0,80			$C\frac{Mg}{III}$	1
s-23-05	ул. Стара-Загора	900 / 0,7	7,18	366,0	80,1	11,5	6,8	56,1	49,6	39,0	0,60	-6,3	-62,3	$C\frac{Ca}{II}$	3
s-23-06	Ипподром	336 / 1	6,83	366,0	240,3	115,2	8,2	112,2	32,2	160,3	1,03	-8,5	-74,2	$C\frac{Na}{II}$	1
s-23-07	Парк Гагарина	7160 / 2	6,96	103,7	44,5	57,6	3,2	46,1	11,2	21,9	0,29	-9,2	-79,4	$C\frac{Ca}{II}$	3
s-23-08	Парк Победы	808 / < 1,2	7,58	170,8	80,1	115,2	4,1	50,1	19,8	77,1	0,51	-6,0	-65,6	$S\frac{Na}{III}$	3
s-23-09	Сквер Родник надежды	1 697 / 1,5	7,88	384,3	372,0	230,4	16,1	171,1	46,1	126,1	1,33	-5,4	-60,9	$C\frac{Ca}{III}$	2
s-24-11			8,22	256,2	382,7	460,8	15,0	226,5	45,9	220,2	1,59			$S\frac{Na}{III}$	2
s-23-11	ул. Советской Армии	815 / 1	6,61	146,4	48,1	76,8	4,6	66,1	16,1	17,3	0,37	-11,1	-87,6	$C\frac{Ca}{II}$	3
s-23-12	Спиридоновский	7514 / 2	7,26	427,0	133,5	88,3	10,2	88,2	71,9	55,2	0,86	-8,8	-76,2	$C\frac{Mg}{II}$	1
s-24-14			7,71	390,4	135,3	153,6	10,3	76,2	80,6	71,5	0,91			$C\frac{Mg}{II}$	1
s-23-13	Леснуха	1770 / 1,5	7,01	152,5	76,5	76,8	4,7	62,1	19,8	35,8	0,42	-11,0	-85,7	$C\frac{Ca}{II}$	3
s-24-20			7,93	183,0	83,7	80,6	5,9	66,1	32,2	26,1	0,47			$C\frac{Ca}{II}$	3
s-23-14	Рядом с Леснухой	882 / 1	6,47	244,0	65,9	115,2	7,0	94,2	28,5	28,8	0,58	-12,0	-91,5	$C\frac{Ca}{II}$	3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
s-23-22	Шишига	13550 / 1,5	7,29	298,9	115,7	34,6	6,4	48,1	49,0	58,2	0,60	-7,2	-67,9	$C\frac{Mg}{II}$	3
s-23-23	Ракитовское шоссе	3760 / 0,5	7,08	494,1	169,1	38,4	13,2	142,3	75,6	10,7	0,93	-6,2	-58,4	$C\frac{Ca}{II}$	1
s-23-24	Паршино	22160 / 4	7,02	152,5	83,7	134,4	5,8	72,1	27,3	42,6	0,51	-7,4	-69,9	$S\frac{Ca}{III}$	3
s-23-25	Солнечная поляна	5390 / 3,2	6,23	305,0	99,7	7,7	5,7	72,1	26,0	52,2	0,56	-5,3	-59,2	$C\frac{Ca}{II}$	3
s-24-18			7,64	305,0	90,8	11,5	6,4	68,1	37,2	32,2	0,54			$C\frac{Ca}{II}$	3
s-23-26	8-я просека	2143 / 1,5	6,87	317,2	67,6	38,4	7,0	70,1	43,4	20,8	0,56	-8,3	-73,4	$C\frac{Ca}{II}$	3
s-22-03	Ботанический сад, нижний	6766 / 5,8	6,24	268,4	327,5	169,0	9,6	79,2	69,4	174,8	1,09			$Cl\frac{Na}{III}$	2
s-23-28			7,01	292,8	468,1	188,2	10,6	92,2	74,4	260,2	1,38	-5,1	-59,0	$Cl\frac{Na}{III}$	2
s-24-15			7,59	183,0	363,1	115,2	8,4	82,2	53,3	166,4	0,96			$Cl\frac{Na}{III}$	2
s-22-02	Сухой	673 / 2	6,34	420,9	81,9	457,0	14,8	161,3	83,1	91,1	1,30			$S\frac{Ca}{III}$	2
s-23-29			7,53	427,0	110,4	384,0	13,7	128,3	90,5	101,1	1,24	-4,1	-54,4	$S\frac{Ca}{III}$	2
s-24-12			7,73	451,4	80,1	303,4	12,8	116,2	86,8	72,8	1,11			$S\frac{Ca}{III}$	2
s-22-01	Чайский	7580 / 1	8,48	189,1	46,3	96,0	3,9	16,0	37,8	58,7	0,44			$S\frac{Na}{II}$	3
s-23-30			8,44	298,9	81,9	69,1	5,5	22,0	54,6	72,3	0,60	-0,7	-40,0	$C\frac{Mg}{II}$	3
s-23-31	Малый Сибур	342 / 1,5	7,20	298,9	73,0	115,2	6,0	62,1	36,0	77,1	0,66	-4,6	-58,8	$C\frac{Na}{II}$	3
s-23-32	Большой Сибур	1837 / 1,5	7,23	719,8	113,9	149,8	16,1	122,2	124,0	46,5	1,28	-8,0	-70,8	$C\frac{Na}{II}$	1
s-23-33	Парк Молодёжный	7345 / 2	6,92	115,9	53,4	115,2	4,4	64,1	14,9	32,2	0,40			$S\frac{Ca}{III}$	3
s-24-19	13 мкн	1900 / 0,5	7,22	183,0	82,8	7,7	3,0	52,1	5,0	57,3	0,39			$C\frac{Na}{II}$	3
s-24-21	Между Леснухой и ул Ново-Садовой	1500 / < 1,5	7,42	488,0	108,6	49,9	8,0	114,2	28,5	94,2	0,88			$C\frac{Ca}{II}$	1

[1] Шифр года отбора; [2] Площадь зеркала и максимальная глубина в межень, по [1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9] и данным авторов; [3] Тип воды по классификации О.А. Алекина [22]; [4] Кластеры гидрохимического состава, выделенные с помощью алгоритма K-средни

Изотопные анализы воды проводились в Инсбрукском университете (Австрия) на анализаторе L2130-i (Picarro, США). Точность измерений составляла <1 ‰ для δ^2H и 0,1 ‰ для $\delta^{18}O$ (1σ). Значения δ^2H и $\delta^{18}O$ нормированы по шкале V-SMOW. Параметры локальной линии метеорных вод (ЛЛМВ) рассчитаны по данным ближайшей станции (г. Саратов) глобальной сети МАГАТЭ изотопов в осадках (GNIP).

Статистическая обработка и построение диаграмм выполнены в программах PAST 4.0 [18], Origin 9 и GW Chart[2]. Индексы насыщения (SI) к различным минералам рассчитаны в RRHEEQC[3].

Результаты

Макрокомпонентный состав. Данные по гидрохимическим составам прудов (см. таблицу 1) были разделены на 3 кластера с помощью алгоритма K-средних (*K-means*), рекомендованного для кластеризации природных вод со смешанными составами [19]. Пространственное положение выделенных кластеров показано на рисунке 1.

Минерализация вод 1-го и 2-го кластеров составляла 0,76–1,59 г/л, а для 3-го кластера она не превышала 0,66 г/л. Воды 1-го кластера имели более высокие значения HCO_3, а 2-го кластера – pH, Ca, Na+K, Cl и SO_4. Часть проб 2-го кластера более обогащена SO_4 (303–457 мг/л, Сухой пруд), а другая часть Cl (327,5–468,1 мг/л, Нижний пруд Ботанического сада) (рисунок 2а). Родники из *P_2ur-d,eQ* имеют более высокую минерализацию (0,98–1,3 г/л), чем родники из *P_2kz* (0,45–0,79 г/л) [17], обусловленную вкладом HCO_3, Cl, Mg, Na+K и SO_4. Медианные концентрации ионов в водах поверхностного стока близки к водам 3-го кластера прудов.

Щелочноземельные металлы (Ca+Mg) преобладали над щелочными (Na+K) в большинстве изученных проб (рисунок 2б). В водах 1-го кластера и родников *P_2ur-d,eQ* преобладало соотношение $HCO_3 > (SO_4+Cl)$, а в водах 2-го кластера и поверхностного стока $HCO_3 < (SO_4 + Cl)$. В пробах 3-го кластера встречались оба соотношения с равной частотой.

Большинство (76 %) проб воды прудов, родников *P_2ur-d,eQ* и поверхностного стока (таблица 2) попали в поле смешанного катионного состава, а для вод *P_2kz* преобладал Ca-тип. В анионном составе доминировали HCO_3-тип (1-й кластер, родники *P_2ur-d,eQ*), смешанный (поверхностный сток) и Cl-тип (2-й кластер). Среди гидрохимических фаций представлены HCO_3-Ca-Mg (преобладала для 1-го кластера и родников *P_2ur-d,eQ*), смешанная Ca-Mg-Cl-SO_4 (преобладала для 2-го кластера и поверхностного стока). Несколько проб 2-го кластера относились к Cl-Na, а одна проба из родника P_2kz – к SO_4-Ca^{2+} фациям. Данные по родникам *P_2ur-d,eQ* за 2022–2024 гг. согласуются с данными за 1999–2000 гг. [17], подтверждая стабильность их состава.

Согласно классификации О. А. Алекина [20] (см. таблицу 1), воды прудов 1-го кластера относятся к гидрокарбонатному классу и подразделяются на кальциевую (50 % проб), магниевую (30 %) и натриевую (20 %) группы по преобладающему катиону. Все пробы, за исключением одной (III типа), относятся ко II типу. Воды 2-го кластера преимущественно представлены хлоридным классом с натриевой группой (44 %) и сульфатным классом с кальциевой группой (33 %), реже – гидрокарбонатным классом кальциевой группы и сульфатным классом натриевой группы; все пробы отнесены к III типу. В водах 3-го кластера преобладает гидрокарбонатный класс (77 %), представленный кальциевой, реже – магниевой и натриевой группами. Редко (11 %) встречаются воды сульфатного класса – кальциевой (11 %) и натриевой (11 %) групп. Воды относятся ко II (83 %) и III (17 %) типам.

[2] Winston R.B. GW_Chart version 1.30: U.S. Geological Survey Software Release, 26 June 2020.

[3] Parkhurst D.L., Appelo C.A.J. User's guide to PHREEQC (Version 2): A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations (No. 99–4259). US Geological Survey. 1999.

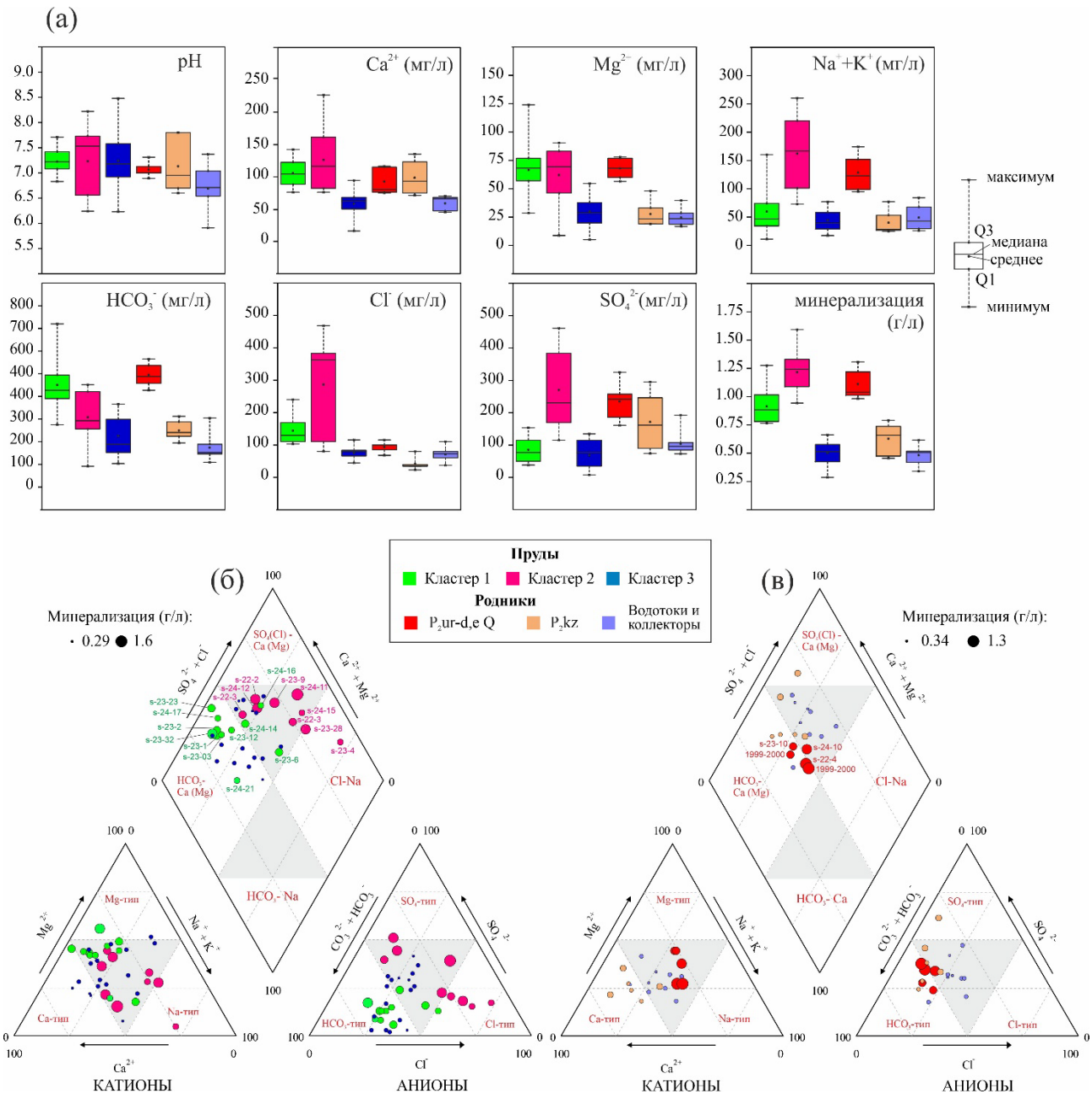


Рисунок 2. Макрокомпонентный состав: (а) – статистические данные; *диаграммы Пайпера*: (b) – пробы воды прудов, (c) – родниковые воды (данные для P_2kz и *P_2ur-d,eQ за* 1999–2000 гг. по [17]) и поверхностный сток

Figure 2. Major ions composition: (a) – statistical data; Piper diagrams: (b) – pond water samples, (c) – spring waters (data for P_2kz and P_2ur-d,eQ for 1999–2000 from [17]) and surface runoff

Воды родников относятся к гидрокарбонатному классу, магниевой и натриевой группам, II типу (таблица 2). В водотоках и коллекторах преобладает гидрокарбонатный класс воды (66 %), представленный кальциевой и реже натриевой группами; значительно реже встречаются сульфатный (кальциевая и натриевая группы) и хлоридный (кальциевая группа) классы. Воды этих объектов представлены II (56 %) и III (44 %) типами.

Таблица 2. Марокомпонентный и изотопный составы воды родников, поверхностного стока и водопроводной воды
Table 2. Major ions and isotopic compositions of water from of springs, surface watercourses, and tap water

Код пробы	Объект	pH	HCO_3^-, мг/л	Cl^-, мг/л	SO_4^{2-}, мг/л	Жест., ммоль/л	Ca^{2+}, мг/л	Mg^{2+}, мг/л	Na+K, мг/л	М., г/л	$\delta^{18}O$, V-SMOW	δ^2H, V-SMOW	Тип воды[1]
Родники													
s-22-04	Ботанический сад	6,89	536,8	99,7	257,3	10,4	116,2	56,4	152,0	1,22			$C\frac{Na}{II}$
s-23-10	Родник Надежды	7,13	457,5	115,7	161,3	10,0	76,2	76,9	94,6	0,98	-12,7	-94,5	$C\frac{Mg}{II}$
s-24-10		7,31	427,0	99,7	241,9	9,5	80,2	68,2	122,8	1,04			$C\frac{Mg}{II}$
s-23-18	Пойма р. Волга-1										-12,8	-94,8	
s-23-20	Пойма р. Волга-2										-12,8	-95,3	
s-23-27	Пойма р. Волга-3										-12,4	-92,1	
Поверхностный сток, дренажно-ливневые коллекторы, водопроводная вода													
s-22-05	Левый приток руч. Постников	5,91	109,8	37,4	99,8	3,7	46,1	16,7	29,4	0,34			$S\frac{Ca}{II}$
s-22-06	руч. Постников, перед коллектором	6,71	170,8	87,2	107,5	4,6	45,1	28,5	67,7	0,51			$C\frac{Na}{II}$
s-22-07	Колл. руч. Постников -1	6,54	152,5	53,4	84,5	4,3	47,1	23,6	34,8	0,40			$C\frac{Ca}{III}$
s-22-08	Колл. руч. Постников -1	6,05	195,2	67,6	115,2	5,0	53,1	29,1	57,6	0,52			$C\frac{Ca}{II}$
s-23-37	Нагорная канава	6,92	305,0	73,0	73,0	5,6	70,1	26,0	68,4	0,62			$C\frac{Ca}{II}$
s-23-36		7,04	189,1	110,4	76,8	6,6	68,1	39,7	27,8	0,51			$Cl\frac{Ca}{III}$
s-24-06	Колл. Колесникова оврага	7,37	152,5	60,5	92,2	5,0	68,1	19,8	25,8	0,42			$C\frac{Ca}{III}$
s-24-23	Колл. Силикатного оврага-1	7,04	146,4	80,1	96,0	4,8	66,1	18,6	42,7	0,45			$C\frac{Ca}{III}$
s-24-01	Колл. Силикатного оврага-2	6,64	146,4	73,0	192,0	4,8	66,1	18,6	84,0	0,58			$S\frac{Na}{II}$
s-23-19	р. Волга										-12,7	-94,3	
s-23-35	Водопроводная вода										-12,1	-91,6	

[1] Тип воды по классификации О. А. Алекина [20]

Таблица 3. Микроэлементные составы воды прудов г. Самара и родника Надежды (в мкг/л)
Table 3. Trace element concentrations in the water of ponds in Samara and the Nadezhda spring (in μg/l)

Проба	Ti	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Sr	Zr	Mo	Cd	Sb	Ba	Pb	Th	U
Пруды																				
s-23-01	0,7	5,0	3,4	5,0	0,30	6	1,8	0,01	0,01	4,20	1,10	700	0,24	0,50	0,0002	0,60	80	2,20	0,002	1,7
s-23-02	7,0	7,0	5,0	40,0	0,60	7	5,0	110	0,15	3,00	0,69	1000	0,24	0,13	0,0002	0,40	80	0,80	0,050	1,2
s-23-03	1,2	5,0	4,1	6,0	0,23	4	2,5	0,01	0,02	2,50	0,09	500	0,20	0,80	0,0002	0,50	70	0,09	0,008	1,1
s-23-04	8,0	9,0	4,7	40,0	0,60	6	6,0	40,0	0,13	5,10	0,30	480	0,70	5,00	0,0002	2,30	160	0,08	0,060	3,3
s-23-05	11,0	6,0	4,1	70,0	0,90	6	5,0	70,0	0,20	1,60	0,09	480	0,50	0,70	0,0002	0,90	70	1,20	0,050	1,8
s-23-06	15,0	9,0	6,0	60,0	1,00	9	11,0	10,0	0,22	4,00	0,13	500	0,60	0,25	0,1600	0,70	90	2,70	0,070	0,4
s-23-07	5,0	4,0	2,9	15,0	0,40	6	3,5	70,0	0,10	1,08	0,09	320	0,19	0,26	0,0002	0,40	41	0,01	0,024	0,1
s-23-08	12,0	5,0	3,7	60,0	0,70	5	3,7	90,0	0,19	1,60	0,09	410	0,12	0,19	0,0002	0,30	52	8,00	0,060	0,2
s-23-09	0,3	9,0	3,5	12,0	0,15	3	4,1	0,01	0,03	5,30	0,11	460	0,09	1,70	0,0002	0,70	32	0,01	0,004	5,8
s-23-11	2,4	2,6	2,2	8,0	0,19	3	3,7	30,0	0,06	0,88	0,09	430	0,13	0,16	0,0002	0,29	40	0,01	0,011	0,2
s-23-12	7,0	5,0	3,6	14,0	0,40	7	3,1	30,0	0,07	2,70	0,09	600	0,50	0,80	0,0002	0,50	80	0,01	0,050	1,7
s-23-13	0,1	2,8	2,1	1,9	0,17	4	3,7	0,01	0,02	1,60	0,09	390	0,11	0,60	0,0002	0,60	43	0,01	0,004	0,4
s-23-14	21,0	8,0	6,0	50,0	1,40	21	6,0	19,0	0,40	1,70	0,09	600	0,40	0,29	0,0002	0,50	70	2,40	0,040	0,3
s-23-22	0,1	2,8	4,3	3,0	0,16	4	1,2	0,01	0,02	1,50	0,09	460	0,10	0,40	0,0002	0,20	51	0,01	0,003	0,8
s-23-23	14,0	8,0	4,6	60,0	1,10	8	5,0	300,0	0,25	2,70	0,09	700	0,40	0,34	0,0002	0,30	110	2,20	0,050	1,0
s-23-24	1,4	3,6	4,1	22,0	0,31	4	3,0	0,01	0,03	1,70	0,09	600	0,30	1,00	0,0002	0,50	36	0,01	0,013	1,4
s-23-25	14,0	8,0	3,7	300,0	0,90	6	2,4	9,00	0,27	2,00	0,09	460	0,18	0,21	0,0002	0,50	90	1,50	0,100	0,3
s-23-26	0,9	2,2	2,7	2,1	0,19	4	1,1	0,01	0,01	1,40	0,09	400	0,70	0,08	0,0002	0,24	55	0,01	0,007	0,2
s-23-28	16,0	17,0	5,1	40,0	1,00	8	5,0	1,50	0,29	6,20	0,97	900	0,50	0,15	0,0002	0,40	60	1,20	0,060	0,3
s-23-29	25,0	11,0	9,0	150,0	1,90	12	6,0	40,0	0,50	2,90	2,00	900	0,90	0,70	0,0002	0,29	90	3,00	0,080	1,9
s-23-30	3,0	5,0	5,0	8,0	0,50	8	4,0	3,00	0,08	2,60	1,05	460	0,23	1,60	0,0002	0,90	60	0,01	0,040	3,0
s-23-31	5,0	3,4	2,9	6,0	0,40	9	1,1	0,01	0,02	1,90	0,61	1400	0,20	0,27	0,1400	0,31	90	1,80	0,017	2,7
Родник																				
s-23-10	10,0	6,0	6,0	30,0	0,60	5	4,0	40	0,14	2,40	1,80	1000	0,18	0,90	0,0002	0,30	70	5,00	0,040	11,0

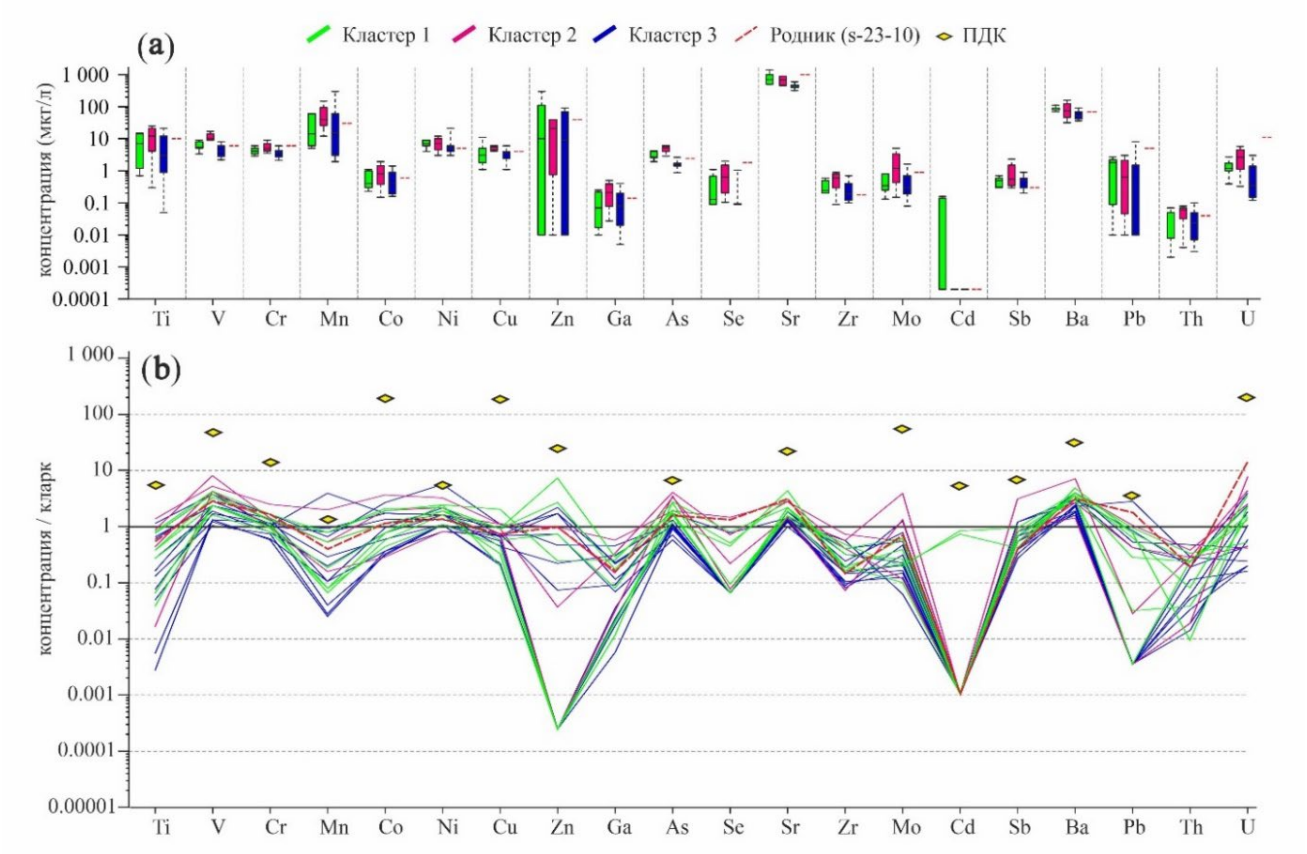


Рисунок 3. Содержание металлов и металлоидов: (а) – статистические данные; (б) – сравнение с кларковыми значениями и ПДК

Figure 3. Metal and metalloid content: (a) – statistical data; (b) – comparison with Clarke's values and MPCs

Изотопный состав. Воды р. Волги и родников (рисунок 4) имеют практически идентичные изотопные составы ($\delta^{18}O$ = -12,4…-12,8 ‰ и $\delta^{2}H$ = -92,1...-95,3 ‰), что изотопно-легче средневзвешенного состава региональных осадков (ок. $\delta^{18}O$ = -10,5 ‰ и $\delta^{2}H$ = -75,7 ‰). Это отражает питание речных и подземных вод изотопно-легкими осадками холодного времени года, когда испарение минимально. Для вод прудов наблюдается обогащение тяжелыми изотопами и смещение вправо-вверх от ЛЛМВ, характерное для кинетического фракционирования при испарении, при котором ^{16}O активнее переходит в пар, чем ^{1}H [22].

Состав исходных вод (до испарения), рассчитанный путём экстраполяции линии испарения (R^2 = 0,99; тангенс 4,5) на ЛЛМВ [23], составляет $\delta^{18}O$ = -12,8 ‰ и $\delta^{2}H$ = -95,3 ‰. Это значение соответствует речным и подземным водам, подтверждая, что питание прудов подчиняется там же региональным закономерностям (без существенного влияния летних осадков). Воды 1-го кластера в целом менее изотопно-обогащены ($\delta^{18}O$ = -6,2…-8,8 ‰), чем 2-го кластера ($\delta^{18}O$ = -4,1…-6,4 ‰), а воды 3-го кластера имеют наиболее лабильные составы ($\delta^{18}O$ = -0,7…-12,0 ‰).

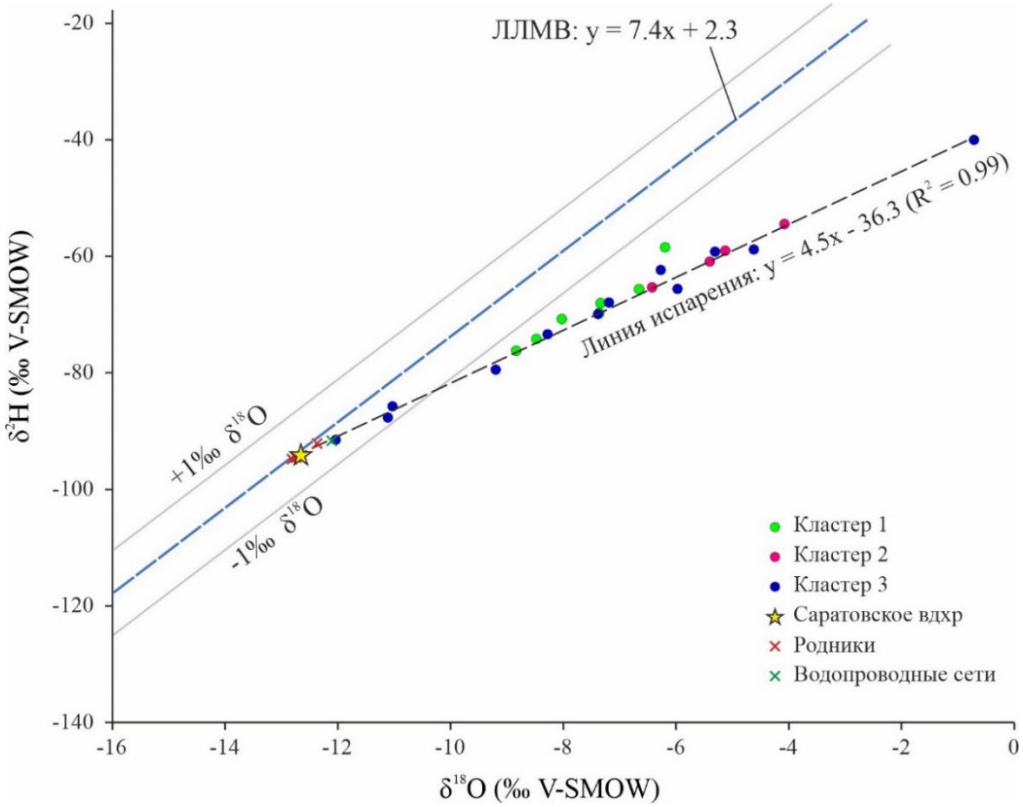


Рисунок 4. Фигуративные точки изученных вод по диаграмме δ^2H-$\delta^{18}O$ в сравнении с локальной линией метеорных вод (ЛЛМВ)

Figure 4. Plotted data points for the studied waters on the δ^2H–$\delta^{18}O$ diagram, compared with the local meteoric water line (LMWL)

Обсуждение

Макрокомпонентный состав.[4] Для выявления взаимосвязей между компонентами ионного состава и различными объектами, наборы данных проанализированы методом главных компонент (PCA). Первые два компонента (PC-1 и PC-2) объясняют 71,4 % дисперсии (рисунок 5а). На PC-1 наибольшую факторную нагрузку оказывают Ca, Mg, HCO_3, SO_4 и минерализация (TDS), тогда как для PC-2 наиболее значимые элементы HCO_3, Na+K и Cl (рисунок 5б). Большинство проб 1-го кластера находятся под сильным влиянием HCO_3–Mg (что может маркировать влияние карбонатов), а пробы 2-го кластера в основном контролировались SO_4–Ca–минерализация (влияние эвапоритов) и Cl–Na+K (засоление). Воды 3-го кластера и поверхностного стока совместно группируются в области PC-1<0, показывая высокое сходство друг с другом.

Большинство проб воды прудов 1-го и 3-го кластеров имеют соотношение $SO_4/Ca < 1$, указывающее происхождение Ca преимущественно из карбонатных и/или силикатных пород (рисунок 6а). Большинство водных проб родников и прудов 2-го кластера близки к соотношению $SO_4/Ca = 1$, указывающему на растворение эвапоритов [24]. Ряд водных проб имеют избыток SO_4, связанный с его дополнительными источниками (окисление сульфидов, атмосферное загрязнение) или выведением Ca из раствора.

Максимальные концентрации Cl в водах прудов (468,1 мг/л) значительно выше, чем в подземных водах *P_2ur-d,eQ* и *P_2ur* за пределами городской застройки (10–80 мг/л) [17]. По всей видимости, засоление вод связано с типичным для многих крупных городов [25, 26] влиянием

[4] Здесь и ниже мы используем только собственные данные 2022–2024 гг.

антигололёдных реагентов. Соотношения Na/Cl в снеге, загрязнённом дорожной солью, находится в диапазоне 1–0,7 [25]. Воды родников, поверхностного стока и части прудов (2-го и 3-го кластеров) имеют Na/Cl > 1[5] (рисунок 6б). Избыток Na объясняется гидролизом силикатов или катионным обменом по схеме $Ca+Mg_{вода} \rightarrow Na_{порода}$ [30]. Примерно в половине проб (и в большинстве вод 1-го кластера) соотношение Na/Cl <0,7, что указывает на расходование Na в реакциях обратного катионного обмена $Na_{вода} \rightarrow Ca+Mg_{порода}$ [28, 29, 30].

Состав воды, контролирующийся только растворением карбонатов или гипса/ангидрита, имеет соотношение $(Ca+Mg)/(SO_4+HCO_3) = 1$ [27]. Соотношения < 1 (воды родников, рисунок 6в) указывает на катионный обмен, гидролиз силикатов или источники SO_4 и HCO_3, не связанные с горными породами. Соотношение > 1 (большинство проб воды 1-го и часть 2-го кластеров) характерны для обратного катионного обмена [27].

Влияние ионно-обменных процессов так же может быть оценено с помощью индексов CAI-1 и CAI-2 [30], которые рассчитываются по формулам 1 и 2:

$$CAI\text{-}1=(Cl^- - (Na^+ + K^+))/Cl^- \quad (1)$$

$$CAI\text{-}2=(Cl^- - (Na^+ + K^+))/(SO_4^{2-} + HCO_3^- + CO_3^{2-} + NO_3^{2-}) \quad (2)$$

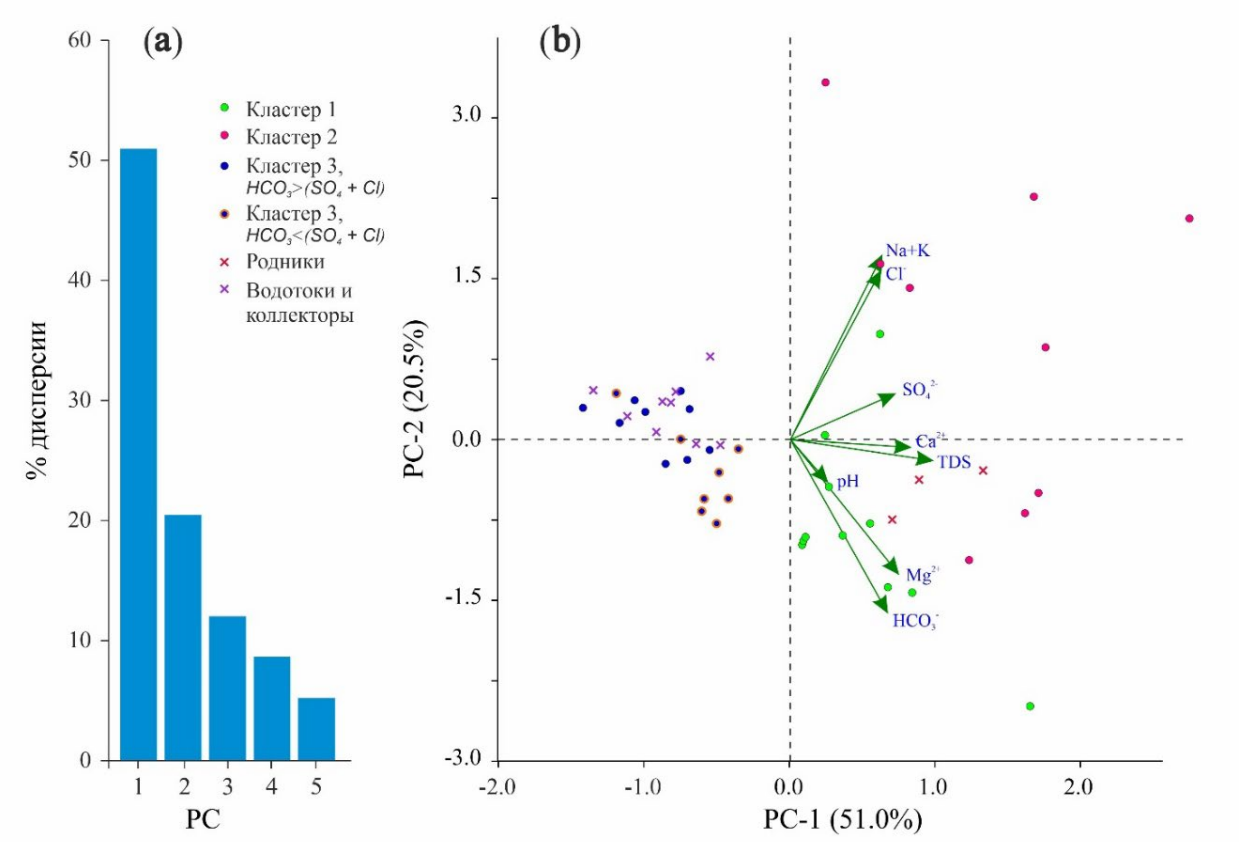


Рисунок 5. Анализ данных методом главных компонент (PCA): (a) – проценты дисперсии, объясняемой каждым главным компонентом (PC); (b) – диаграмма первых двух главных компонент (PC-1 и PC-2). Длины векторов соответствуют силе влияния переменной, а направления между ними показывают корреляционные соотношения

Figure 5. Principal Component Analysis (PCA): (a) The percentage of variance explained by each principal component (PC); (b) A plot of the first two principal components (PC-1 and PC-2). The vector lengths correspond to the strength of a variable's influence, while the vector directions indicate the correlation relationships

[5] Здесь и далее, с допущением, что $Na^+ = Na^+ + K^+$

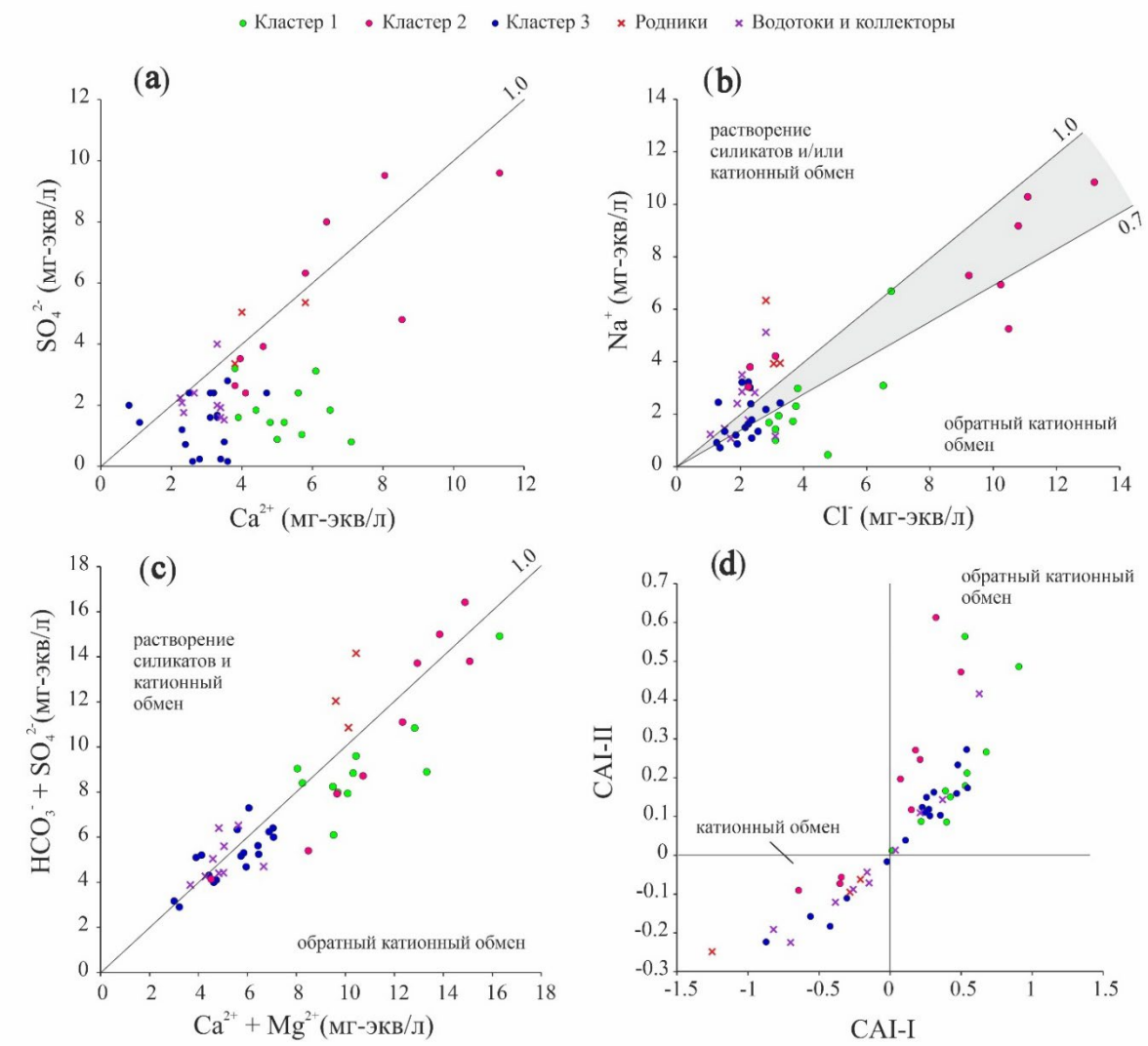


Рисунок 6. Соотношения различных ионов и гидрохимических индексов: (a) – SO_4^{2-} и Ca^{+2}; (b) – Na и Cl, серой заливкой показан диапазон значений для снега, загрязненного дорожной солью [26]; (c) – $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ и $SO_4^{2-} + HCO_3$; (d) – индексы CAI-1 и CAI-2 [30]

Figure 6. Ratios of various ions and hydrochemical indices: (a) SO_4^{2-} and Ca^{2+}; (b) Na^+ and Cl^-; The grey shading indicates the range of values for snow contaminated with road salt [26]. (c) $Ca^{2+} + Mg^2$ and $SO_4^{2-} + HCO_3$; (d) CAI-1 and CAI-2 indices [30]

Значения индексов CAI-1 и CAI-2 ≠ 0 указывают на развитие процессов катионного обмена между водой и силикатными породами (рисунок 6г). Индексы > 0, предполагающие схему $Na_{вода} \rightarrow Ca+Mg_{порода}$ (обратный обмен), имели все водные пробы 1-го, и большинство проб 2-го и 3-го кластеров (см. рисунок 5г). Индексы < 0, предполагающие схему $Ca+Mg_{вода} \rightarrow Na_{порода}$, имели воды родников, поверхностного стока и некоторые пробы 2-го и 3-го кластеров. Тем самым, расчёт индексов CAI-1 и CAI-2 подтверждает участие обеих форм ионного обмена.

Соотношения pH и индексов насыщения (SI) к кальциту и доломиту показаны на рисунке 7. Большинство водных проб 1–2-го кластеров и родников имели pH 7…8 и SI > 0 (пересыщение). В область SI < 0 (агрессивность) попали воды поверхностного стока и некоторые пробы 1–2-го кластеров. Пробы воды 3-го кластера с равной частотой попадают в агрессивную и пересыщенную области.

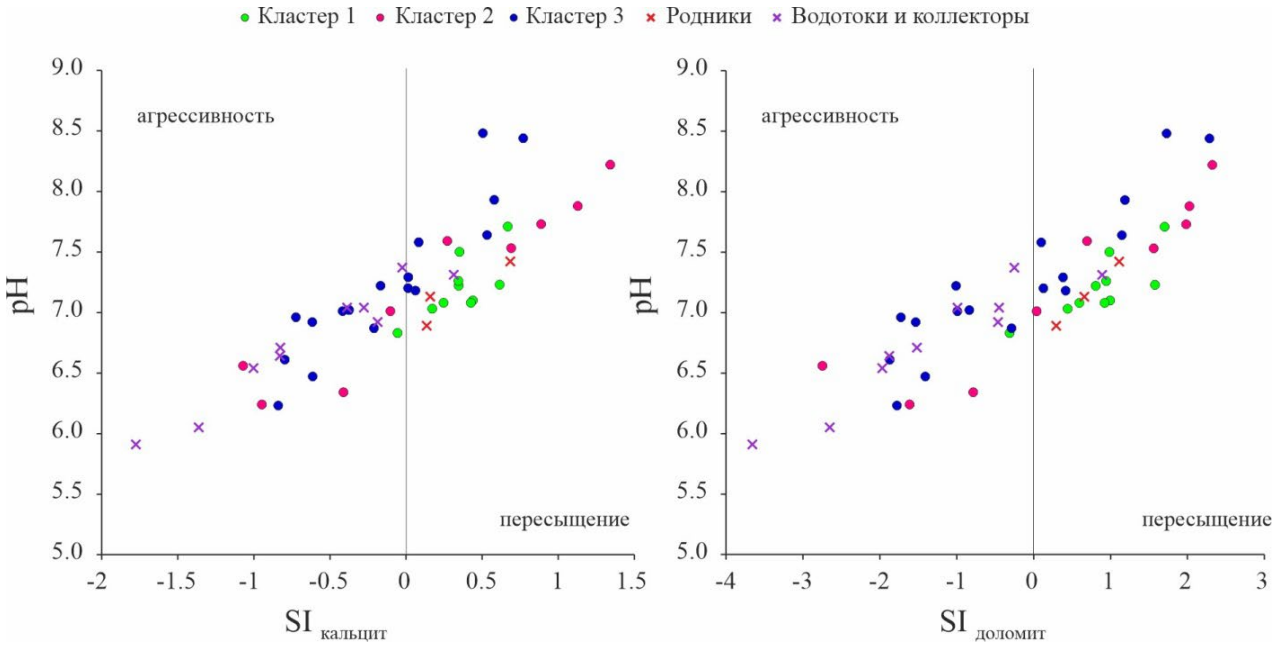


Рисунок 7. Соотношения pH и индексов насыщения (SI) к кальциту и доломиту
Figure 7. Relationship between pH and saturation indices (SI) for calcite and dolomite

Для вод, сформированных под влиянием карбонатных пород, pH контролируются балансом $CO_2+H_2O\leftrightarrow H_2CO_3\leftrightarrow H+HCO_3$ при взаимодействии воды с почвенным/атмосферным воздухом и породами. Для них более низкие pH и SI < 0 характерны в зоне питания, при продвижении по водоносному горизонту вода уравновешивается с карбонатами (SI = 0), а при выходе в зону аэрации происходит дегазация CO_2 и повышение pH и SI > 0 [31].

Воды некоторых прудов, несмотря на высокие содержания HCO_3, Ca и Mg (1–2-ой кластеры) и длительное испарение, имели pH < 7 и SI < 0 к карбонатам. Это означает, что pH контролировали не только реакции карбонатной системы. Вероятнее всего, подкисление связано с выделением CO_2 при деструкции органического вещества [32]. В условиях техногенного засоления оно так же может быть следствием ионно-обменных реакций $Na_{вода}\rightarrow H_{порода}$ при дефиците обменных оснований в породах и почвах [28]. Подкисление воды будет способствовать дальнейшему растворению карбонатов и гидролизу силикатов, трансформируя состав воды. Важным фактором в экосистемах прудов, повышающим pH (и вызывающим пресыщение к карбонатам) является потребление H_2CO_3 и HCO_3 при цветении фитопланктона [9, 32].

Микрокомпонентный состав. Корреляционные связи между основными ионами, металлами и металлоидами, визуализированы с помощью сетевой диаграммы (рисунок 8а).

Выявлено 4 ассоциации (жирным шрифтом выделены основные элементы с наиболее тесными связями).

Ассоциация ***Th-Ti-Ga-Co****-V-Ni-Cr-Zr-Mn-Cu* включает малоподвижные элементы-гидролизаты (Th, Ti, Ga, Zr), мигрирующие в природных водах с органическими и минерально-органическими коллоидами [33]. Редокс-чувствительный Mn коррелирован с Th (см. рисунок 7б), что так же свидетельствует о его коллоидной миграции. Известно, что присутствие коллоидов, адсорбирующих на себе (окси)гидроксиды, ускоряет окисление Mn в озёрных водах [34]. Присутствие Co, V, Ni, Cr и Cu может быть связано с их совместным осаждением с (окси)гидроксидами Mn и Fe [35]. По всей видимости, эта ассоциация связана с силикатными породами и почвами.

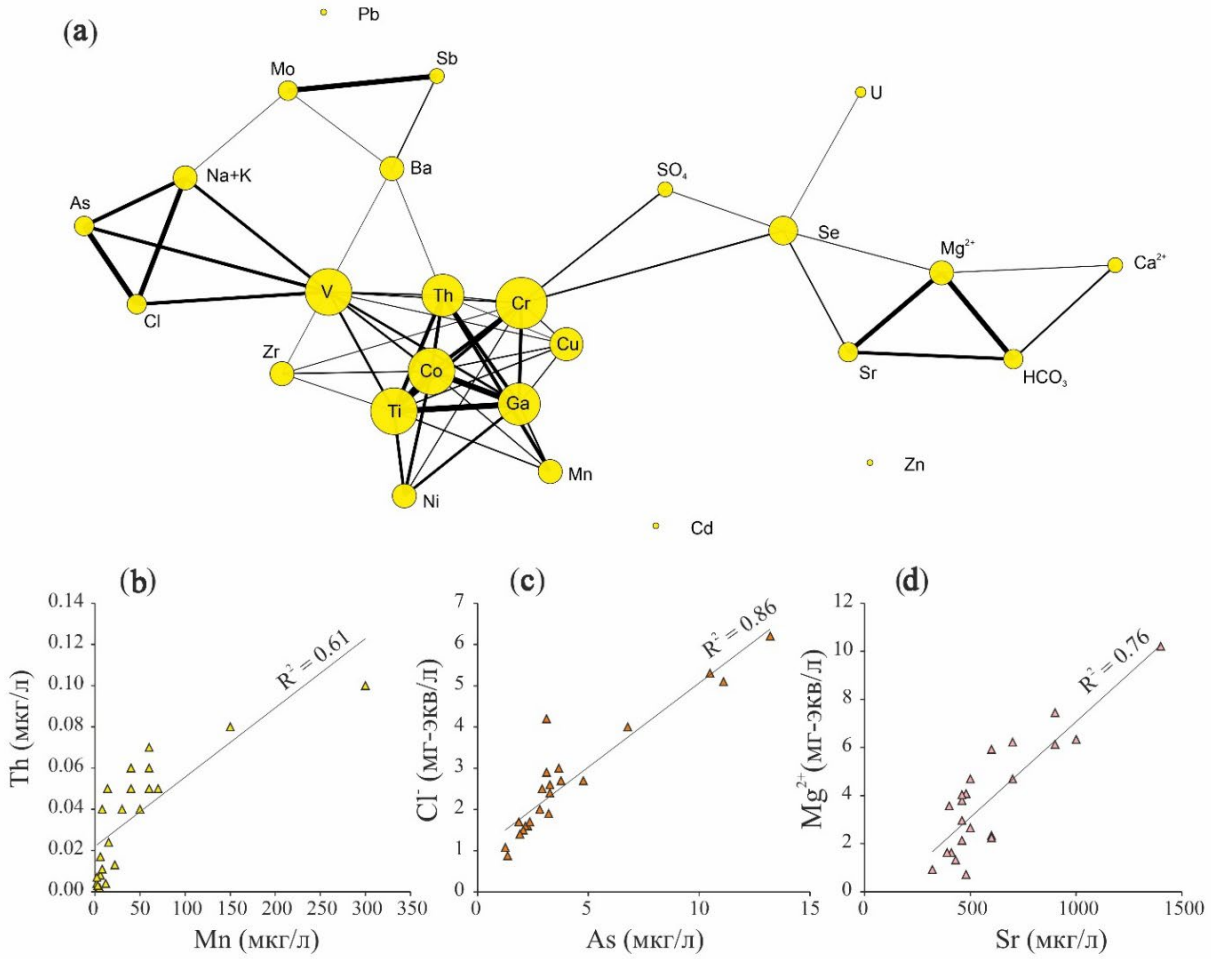


Рисунок 8. Корреляции между металлами, металлоидами и основными ионами: (a) – сетевая диаграмма, показывающая корреляции Пирсона> 0,5 (p <0,05). Толщина линий означает силу корреляционных связей, а диаметр маркера – количество связей у элемента; (b, c, d) – зависимости Th-Mn, Cl-As и Mg-Sr

Figure 8. Correlations between metals, metalloids and base ions: (a) A scatter plot showing Pearson correlations higher than 0,5 (p less than 0,05). The thickness of the lines indicates the strength of the correlations and the size of the markers indicates the number of correlations for each element; (b, c, d) Th-Mn, Cl-As and Mg-Sr relationships

Ассоциация ***Cl-Na-As*** маркирует влияние антигололёдных реагентов. Тесная корреляция между Cl и As (см. рисунок 7в), по всей видимости, отражает геохимические особенности дорожной соли, поскольку галит может содержать до As до 30 мг/кг [36]. Если допустить, что Cl и As получены только из галита, стехиометрический расчёт показывает содержание в нем As ~12 мг/кг, что укладывается в этот диапазон.

Ассоциация ***Mo-Sb****-Ba.* Совместное накопление Mo и Sb отмечается для озёрных вод, богатых органикой [37], которая так же способны накапливать Ba [38]. Слабая корреляция Ba и Th может указывать на участие силикатных пород, где Mo и Ba могут входить в состав слюд и полевых шпатов [39].

Ассоциация ***HCO_3-Mg-Sr****-Ca-Se-SO_4-U* контролируется HCO_3, Mg, Ca и SO_4, отражая взаимодействие с карбонатными и сульфатными породами. Корреляция между Mg и Sr (см. рисунок 7г) указывает на общий источник (карбонатные породы) или совместные механизмы концентрирования. Se и U, входящие в эту ассоциацию, так же хорошо подвижны в подземных водах с окислительными условиями [40].

Не входящие в какие-либо ассоциации *Pb, Cd и Zn* являются типичными техногенными поллютантами городской среды [26] и скорее всего, поступают из антропогенных источников (автотранспорт и промышленные предприятия).

Оценка влияния испарительного концентрирования. Высокоминерализованные воды в изолированных водоёмах могут образовываться путем длительного испарения, без участия подземного питания [41]. Поэтому, необходимо оценить возможность формирования вод 1–2-го кластеров за счет концентрирования поверхностного стока.

Оценка с помощью диаграмм Гиббса [42] позволяет предполагать, что испарительное насыщение не являлось основным механизмом (рисунок 9а,б). Более точная оценка может быть получена путём комбинации с изотопными данными. Поскольку изотопное фракционирование в системе $\delta^2H/\delta^{18}O$ реагирует на количество испаренной воды, а не на скорость испарения, обогащение ^{18}O является мерой относительного количества испарительных потерь [23]. Чтобы оценить влияние испарения на концентрацию растворенных веществ, мы построили графики сравнения $\delta^{18}O$ и некоторых ионов (рисунок 9в,г,д).

Достоверные тренды метаморфизации удалось выявить только для проб 3-го кластера. Наиболее сильный тренд (R^2=0,74) получен для консервативного Cl (рисунок 9в). Так же получены тренды, отражающие выведение Ca и увеличение соотношения Mg/Ca по мере обогащения ^{18}O. Для вод со слабым обогащением ($\delta^{18}O$ -12…-8) наблюдалось типичное для карбонатных пород соотношение Mg/Ca = 0,5…1, тогда как в водах Чайского пруда ($\delta^{18}O$ = -0,7) оно достигало 4,1. Расчёт SI к доломиту и кальциту показывает, что многие пробы пересыщены к обоим минералам. Но в связи с вялой кинетикой кристаллизации доломита [43] его осаждение в озёрах происходит редко и в условиях Mg/Ca > 9,5 [44]. В остальных случаях осаждение более термодинамически выгодного кальцита выводит из воды Ca и увеличивает соотношение Mg/Ca.

Тем самым, корреляции между $\delta^{18}O$ и ионными составами вод 3-го кластера подтверждают влияние испарительного насыщения на химизм. Но имеется ряд прудов на склоне долины р. Волги (например, Леснуха), воды которых почти не обогащены ^{18}O несмотря на конец лета, когда испарительные потери должны быть максимальными. Такая особенность предполагает постоянный приток изотопно-необогащенных вод, многократно превышающий испарение [23]). Скорее всего, такие водоёмы искусственно наполняются водопроводными водами (состав которых в Самаре [46] близок к водам нашей серии поверхностного стока, а изотопный состав соответствует речным водам, см. таблица 1). Отсутствие корреляций между $\delta^{18}O$ и ионным составом в водах 1–2-го кластеров может быть связано с индивидуальными для каждого водоёма соотношениями подземных притоков и испарительных потерь [24].

Изотопные составы вод 2-го кластера сильнее обогащены ^{18}O, чем воды 1-го кластера, поэтому необходимо проверить гипотезу, что различия из химического состава связаны с концентрированием. Мы нанесли данные на диаграмму Спенсера [46], описывающую тренды испарительной метаморфизации озёрной воды (рисунок 9е). Большинство фигуративных точек 1-го кластера тяготеет к карбонатно-натриевому тренду №1, а 2-го кластера – к сульфатно-кальциевому тренду №3. Это позволяет сделать вывод, что в большинстве случаев воды 2-го кластера не могли быть получены при испарении вод 1-го кластера, однако, для некоторых точек вблизи тренда №3 сохраняется неопределенность.

Эволюцию гидрохимического состава некоторых вод некоторых прудов можно проследить по ранее опубликованным ретроспективным данным (рисунок 10).

Анионный состав воды *Воронежских озёр* в 2023–2024 гг. близок к пробам 2005 г. [4], а в пропорциях катионов наблюдалось небольшое обогащение Ca и Mg (рисунок 10а). В целом, гидрохимический режим этих прудов можно считать относительно стабильным, что свидетельствует о преимущественном подземном питании.

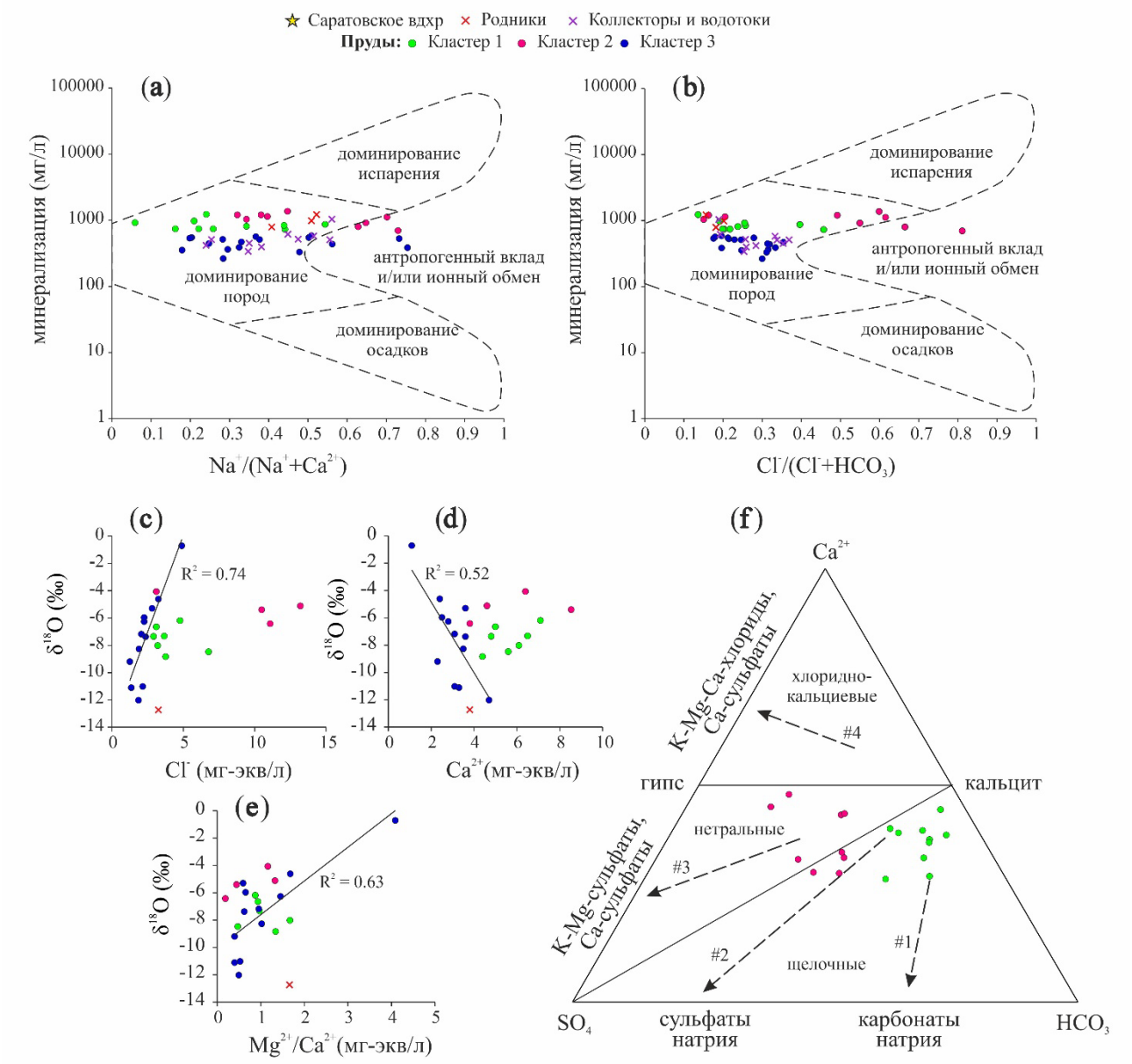


Рисунок 9. Оценка влияния испарительного насыщения на гидрохимический режим прудов: (a, b) – составы вод на диаграммах Гиббса [42]; c, d, e) – связь Cl^-, Ca^{2+} и Mg^{2+}/Ca^{2+} с $\delta^{18}O$; f) – составы вод 1 и 2-го кластеров на диаграмме Спенсера [46], стрелками показаны тренды испарительной трансформации

Figure 9. Assessment of the influence of evaporative saturation on the hydrochemical regime of the ponds: (a, b) – water compositions on Gibbs diagrams [42]; (c, d, e) – relationship between Cl^-, Ca^{2+} and Mg^{2+}/Ca^{2+} and $\delta^{18}O$; (f) – water compositions of the 1st and 2nd clusters on the Spencer diagram [46], with arrows indicating trends in evaporative transformation

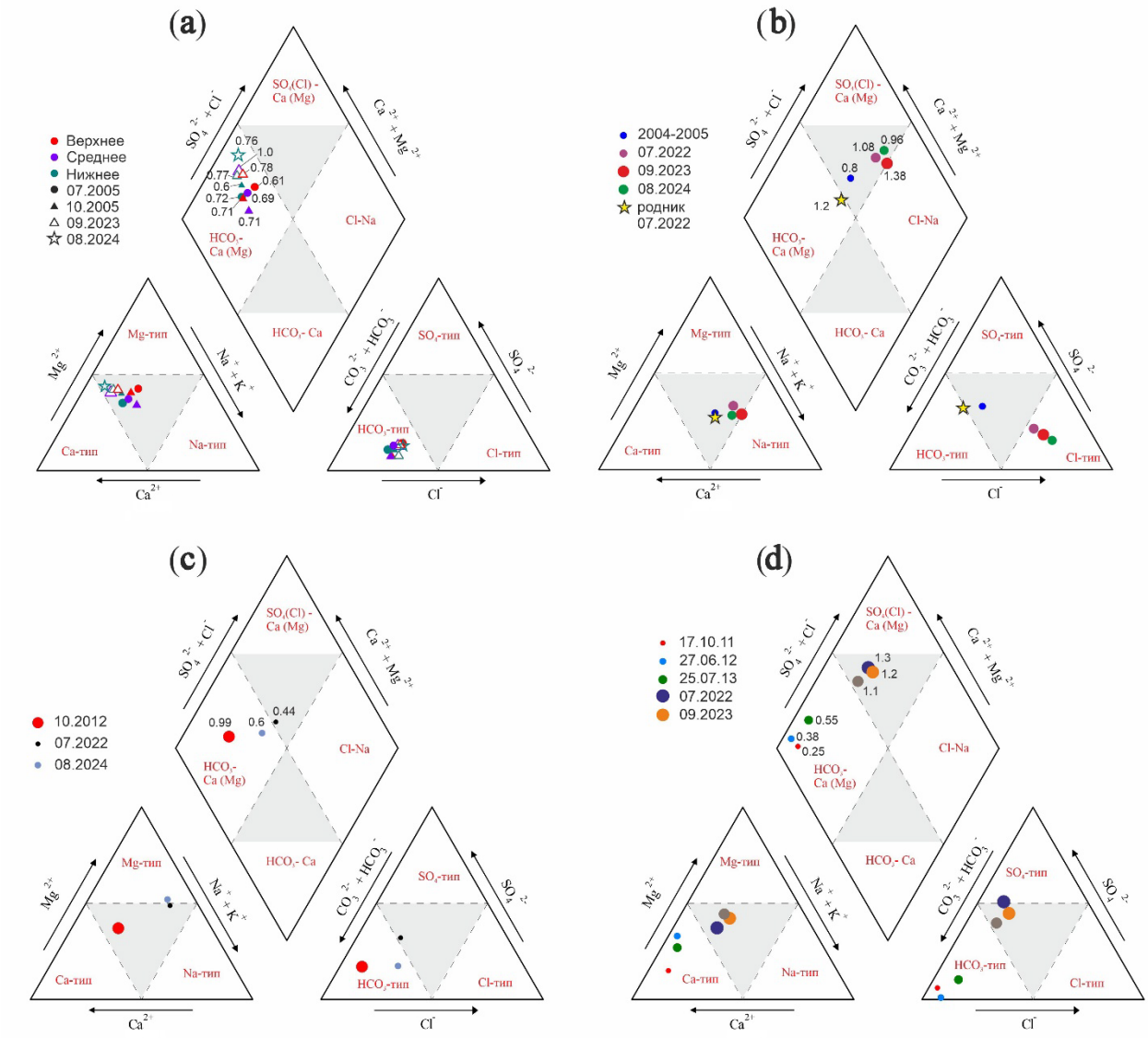


Рисунок 10. Эволюция гидрохимических параметров некоторых прудов: a) – Воронежские озёра, данные 2005 г. [4]; b) – Нижний пруд Ботанического сада, средний состав в 2004–2005 гг. [9] и состав вод родника в 1999–2000 гг. [17]; c) – Чайский пруд, данные за 2012 г. [9]; d) – Сухой пруд, данные за 2011–2013 гг. [7]. Цифры рядом с фигуративными точками обозначают минерализацию (г/л)

Figure 10. Evolution of hydrochemical parameters in selected ponds: a) Voronezhskie Lakes: data from 2005 [4] b) Lower Pond of the Botanical Garden: average composition from 2004–2005 [9], and composition of spring water from 1999–2000 [17]; c) Chaysky Pond: data from 2012 [9]; d) Sukhoi Pond: data from 2011–2013 [7]. The figures next to the dots indicate salinity (g/l).

В 2004–2005 гг. пропорции ионов вод *Нижнего пруда Ботанического сада* [6] близки к водам местного водоносного горизонта (состав вод родника между 1999–2000 гг. [9] и 2022 г. не изменился). В серии наблюдений 2022–2024 гг. (см. рисунок 10б) выявлено прогрессирующие обогащение Cl и Na, отражающее загрязнение дорожной солью (на водосборе находится крупная автострада).

В 2012 г. *Чайский пруд* имел подземное питание: вода относилась к HCO_3-Ca-Mg фации с минерализацией 0,99 г/л [8], а в 2022–2023 гг. (см. рисунок 10в) наблюдались низкоминерализованные воды (0,44–0,6 г/л), подвергнутые сильной испарительной трансформации. Смена режима свидетельствует либо об изоляции котловины водоёма от водоносного горизонта донными осадками, либо об изменении путей движения подземных вод.

В 2012–2013 гг. воды *Сухого пруда* были низко-минерализованными (0,22–0,55 г/л) и относились к HCO_3-Ca-Mg фации [7], а в 2022–2024 гг. минерализация увеличилась до 1,2–1,3 г/л с обогащением Mg^{2+} и SO_4^{2-} и приобретением смешанной Ca-Mg-Cl-SO_4 фации (см. рисунок 10г). В 2017–2018 гг. проводилась рекультивация этого пруда, в процессе которой, видимо, была восстановлена связь с водоносным горизонтом.

Заключение

В распределении гидрохимических параметров вод прудов г. Самары выявлены закономерности, обусловленные геологическими и геоморфологическими факторами. Пруды с наиболее минерализованными водами (1–2-й кластеры) расположены на водораздельной части массива, сложенной слабопроницаемыми породами уржумского яруса (*P_2ur).* Для этих водоёмов надежно диагностируется подземное питание, в котором могут участвовать как пластово-поровые воды *P_2ur*, так и локальные водоносные горизонты в перекрывающих рыхлых четвертичных отложениях (разделение этих типов вод в рамках нашего исследования не представляется возможным). По данным бурения в районе Воронежских озёр [3], кровля *P_2ur,* служащая водоупором четвертичного водоносного горизонта залегает на глубине 30–40 м от поверхности. Скорее всего, пруды изначально создавали в местах разгрузки родников; а при сокращении поверхностного стока после урбанизации подземное питание стало основным.

Формирование химического состава подземных вод, питающих пруды, связано с растворением карбонатных и сульфатных пород, катионным обменом и, возможно, гидролизом силикатов. При этом, в северной части города состав вод отражает участие доломитов (кластер 1), а в южной части города – сульфатных пород (кластер 2). Скорее всего, такие различия связаны с литологической неоднородностью уржумских отложений, в которых могут присутствовать как прослои доломитов и мергелей [12], так и сульфатных пород [14].

Питание прудов 3-го кластера в основном связано с поверхностным стоком. Чаще всего, пруды 3-го кластера расположены на хорошо дренируемых склонах речных долин рек Волги и Самары и обладают значительной площадью водосбора. Так же в эту группу попадают некоторые водоемы в парках и скверах, искусственно наполняемые водопроводной водой и деградирующие пруды на водораздельном плато, утратившие связь с водоносным горизонтом (на примере Чайского пруда).

Основные механизмы метаморфизации вод прудов связаны с засолением под влиянием антигололёдных реагентов, подкислением при деструкции органического вещества (или под влиянием других механизмов), ионным обменом, биологическим потреблением неорганического углерода при фотосинтезе и испарительном концентрированием.

Благодарности

Авторы благодарны д.г.-м.н. Ю. В. Дублянскому (Инсбрукский университет) за выполнение изотопных анализов, А.В. Седых за помощь в полевых работах и директору Ботанического сада к.б.н. С. А. Розно за доступ к объектам. Определение микроэлементного состава методом ИСП-МС проведено в ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН в рамках государственного задания ИГГ УрО РАН № 123011800012-9.

Acknowledgements

The authors thank Dr. Y. V. Dublyansky (University of Innsbruck) for conducting the isotopic analyses and A. V. Sedykh for assisting with the fieldwork. They also thank the Director of the Botanical Garden, Dr. S. A. Rozno, for granting access to the sites. Trace element composition was determined by ISP-MS at the “Geoanalitic” Central Computing Centre of the Institute of Geochemistry, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, as part of the Institute’s state-funded project No. 123011800012-9.

Литература / References

1. Герасимов Ю.Л. Коловратки прудов урбанизированных территорий (г. Самара) // Изв. Сам. науч. центра РАН. 2009. Т.11. № 1. С. 171–176.
2. Захаров Е.В. Особенности структуры зообентоса малых городских водоемов (на примере города Самары). Автореф. дис… к.б.н. Самара, 2004. 22 с.
3. Матвеев В.И., Гейхман Т.В., Соловьева В.В. Самарские пруды как объект ботанических экскурсий. Самара, 1995. 44 с.
4. Соловьева В.В., Саксонов С.В., Матвеев В.И. Озера Самары: история, биоразнообразие, проблемы охраны: монография. Тольятти: Кассандра, 2014. 129 с.
5. Тарасова Н.Г., Буркова Т.Н. Таксономическая и эколого-географическая характеристика альгофлоры планктона прудов г. Самары // Изв. Сам. науч. центра РАН, 2008. Т. 10, № 2. С. 499–504.
6. Шабанова А.В. От сельского хозяйства к рекреации: социально-значимые функции городских водоемов на примере Самары, XIX–XXI в.в. // Регион. развитие: эл. науч.-практ. жур. 2015. № 7(11).
7. Шабанова А.В. Современное состояние прудов Самары. Пруд Сухой // Регион. развитие: эл. науч.-практ. жур. 2016. № 1(13).
8. Шабанова А.В. Современное состояние прудов Самары. Пруд Планового Института // Проблемы трансформации естественных ландшафтов в результате антропогенной деятельности и пути их решения. Краснодар: КГАУ. 2021. С. 365–367.
9. Горбунов М.Ю., Уманская М. В., Краснова Е. С. Характеристика абиотических условий в экосистеме Нижнего пруда Ботанического сада Самарского университета // Бюлл. Самарская Лука. 2007. Т. 16, № 1–2(19–20). С. 131–143.
10. Гусев В.В., Бортников М.П., Таланов А.Г. Геоморфология территории города Самара // Изв. Сам. науч. центра РАН. 2016. Т. 18, № 5–3. С. 425–429.
11. Застрожнова О.И., Орлова Т.Б., Застрожнов А.С. и др. Гос. геол. карта РФ масштаба 1:1 000 000. Третье поколение. Серия Центрально-Европейская. Лист N-39. Казань–Самара. Комплект карт и объясн. зап. СПб.: ВСЕГЕИ, 2021. 467 с.
12. Давлетшин К.А., Косов С.А. Гос. геол. карта РФ масштаба 1:200 000. Серия Средневолжская, лист N-39-XXVI (Новокуйбышевск). Комплект карт и объясн. зап. СПб.: ВСЕГЕИ, 2000.
13. Кириков В.П. (ред.) Гос. геол. карта РФ. Масштаб 1:1000000 (новая серия). Лист N-(38), (39). Самара. Комплект карт и объясн. зап. СПб.: ВСЕГЕИ, 2000. 325 с.
14. Бортников М.П. Геология Самарской области. Самара: СГТУ, 2010. 112 с.
15. Бухман Л.М. Инженерно-геологические и гидрологические характеристики территории при реабилитации малых водных объектов (на примере парковых прудов города Самары) // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Самара: СГТУ. 2019. С. 404–410.
16. Чабаева М.А., Гусев В.В., Баева Е.Э., Таланов А.Г., Щербаков А.Ю., Хохлова Н.Ю. Подземные воды г. Самара // Сергеевские чтения. Материалы годичной сессии. науч. совета РАН по пробл. геоэкологии, инж. геол. и гидрогеол. Москва: ГЕОС. 2008. № 10. С. 369–372.
17. Довбыш В.Н. (ред.) Родники Самарской области. Самара, 2002. 531 с.
18. Hammer Ø., Harper D.A., Ryan P.D. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. Palaeontologia electronica, 4(1): 9, 2001.
19. Irigoyen-Campuzano J.R., Barraza-Barraza D., Gutiérrez M., Torres-Castañón L.A., Reynoso-Cuevas L., Alarcón-Herrera M.T. Hydrogeochemical Characterization of an Intermontane Aquifer Contaminated with

Arsenic and Fluoride via Clustering Analysis. Hydrology, 2024, Vol. 11(6). DOI: 10.3390/hydrology11060076.

20. Алекин О. А. Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеорологическое издательство (Гидрометеоиздат), 1970. 444 с.
21. Шварцев С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. М., 1998. 288 с.
22. Ферронский В.И., Поляков В.А. Изотопы гидросферы земли. М.: Науч. мир, 2009. 632 с.
23. Gat J.R. Stable Isotopes of Fresh and Saline Lakes / Physics and Chemistry of Lakes. Ed by: Lerman A., Imboden D.M., Gat J. R. Springer, Berlin, Heidelberg, 1995, pp.139–165. DOI: 10.1007/978-3-642-85132-2_5.
24. Datta P.S., Tyagi S.K. Major ion chemistry of groundwater in Delhi area: Chemical weathering processes and groundwater flow regime. J. Geol. Soc. India, 1996, vol. 47, pp. 179–188. DOI: 10.17491/jgsi/1996/470205.
25. Nyambar I.N.A., Viswanathan M.P. Assessment on urban lakes along the coastal region of Miri, NW Borneo: implication for hydrochemistry, water quality, and pollution risk. Envir. Sc. and Poll. Res., 2024, vol. 31(29), pp. 41306–41328. DOI: 10.1007/s11356-023-25172-9.
26. Vlasov D., Vasil'chuk J., Kosheleva N., Kasimov N. Dissolved and suspended forms of metals and metalloids in snow cover of megacity: partitioning and deposition rates in Western Moscow. Atmosphere, 2020. № 11(9), 907. DOI: 10.3390/atmos11090907.
27. Rajmohan N.; Elango L. Identification and evolution of hydrogeochemical processes in the groundwater environment in an area of the Palar and Cheyyar River Basins, southern India. Environ. Geol., 2004, vol. 46, pp. 47–61.
28. Moiseenko T.I. Gashkina N.A. Zonal features of lake acidification. Water Resources, 2011, vol. 38, pp.47–62. DOI: 10.1134/S0097807811010076.
29. Vinograd N, Porowski A. Application of isotopic and geochemical studies to explain the origin and formation of mineral waters of Staraya Russa Spa, NW Russia. Envir. Earth Sciences, 2020, vol. 79(8), pp. 3–17. DOI: 10.1007/s12665-020-08923-6.
30. Schoeller H. Geochemistry of groundwater Groundwater Studies / An International Guide for Research and Practice. UNESCO: Paris, 1977, №15, pp. 1–18.
31. Johnston V.E., Šarc F., Wątor K., Otoničar B. Hydrogeochemical data from carbonate springs as an aid for delimiting catchment areas in the Rovte region, Central Slovenia. J. of Hydrol.: Reg. Studies., 2024, Dec 1;56:102087. DOI: 10.1016/j.ejrh.2024.102087.
32. Tucker C.S., D'Abramo L.R. Managing high pH in freshwater ponds. Stoneville: Southern Regional Aquaculture Center. 2008.
33. Pokrovsky O.S., Manasypov R.M., Loiko S.V., Krickov I.A., Kopysov S.G., Kolesnichenko L.G., Kirpotin S.N. Trace element transport in western Siberian rivers across a permafrost gradient. Biogeosciences. 2016. V. 13(6). P. 1877–1900. DOI: 10.5194/bg-13-1877-2016.
34. Pontér C., Ingri J., Boström K. Geochemistry of manganese in the Kalix River, northern Sweden. Geoch. et Cosm. Acta. 1992, vol. 56(4), pp. 1485–1494. DOI: 10.1016/0016-7037(92)90218-8.
35. Frost P.C., Song K., Buttle J.M., Marsalek J., McDonald A., Xenopoulos M.A. Urban biogeochemistry of trace elements: what can the sediments of stormwater ponds tell us? Urban ecosystems, 2015, vol. 18, pp. 763–75. DOI: 10.1007/s11252-014-0428-2.
36. Smedley P.L., Kinniburgh D.G. A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. Appl. geoch., 2002, vol. 17(5), pp. 517–568. DOI: 10.1016/S0883-2927(02)00018-5.

37. Elbaz-Poulicheet F., Nagy A., Cserny T. The distribution of redox sensitive elements (U, As, Sb, V and Mo) along a river-wetland-lake system (Balaton Region, Hungary). Aquatic Geochem., 1997, vol. 3, pp. 267–82. DOI: 10.1023/A:1009616214030.

38. Dehairs F., Jacquet S., Savoye N., Van Mooy B.A., Buesseler K.O., Bishop J.K., Lamborg C.H., Elskens M., Baeyens W., Boyd P.W., Casciotti K.L. Barium in twilight zone suspended matter as a potential proxy for particulate organic carbon remineralization: Results for the North Pacific. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2008, vol. 55(14–15), pp. 1673–1683. DOI: 10.1016/j.dsr2.2008.04.020.

39. Jones K.C., Lepp N.W. Obbard J.P. Other metals and metalloids. Heavy metals in soils. Glasgow: Blackie & Son Ltd, 1990. P. 291–298.

40. Krickov I., Vorobyev S., Kolesnichenko L., Kolesnichenko Y., Zinchenko D., Shirokova L., Pokrovsky O. Export fluxes of dissolved, colloidal and particulate organic carbon, major and trace elements from the Ob River and its tributaries across seasons. Water Research, 2025, vol.275, 123221. DOI: 10.1016/j.watres.2025.123221.

41. Fernández-Aláez C., Fernández-Aláez M., Trigal Domínguez C., Luis Santos B. Hydrochemistry of northwest Spain ponds and its relationships to groundwaters. Limnetica, 2006, vol. 25(1–2), pp. 433–452. DOI: 10.23818/limn.25.31.

42. Gibbs R.J. Mechanisms controlling world water chemistry. Science, 1970, vol. 170, pp. 1088–1090.

43. Morse J.W., Arvidson R.S. The dissolution kinetics of major sedimentary carbonate minerals. Earth-Science Reviews, 2002, vol. 58(1–2), pp. 51–84. DOI: 10.1016/S0012-8252(01)00083-6.

44. Novoselov A., Konstantinov A., Konstantinova E., Simakova Y., Lim A., Kurasova A., Loiko S., Pokrovsky O.S. Semiarid lakes of southwestern Siberia as sentinels of on-going climate change: hydrochemistry, the carbon cycle, and modern carbonate mineral formation. Atmosphere, 2023, vol. 14(11), 1624. DOI: 10.3390/atmos14111624.

45. Березин И.И., Мустафина Г.И. Региональные особенности химического состава питьевой воды хозяйственно-питьевого водоснабжения города Самары // Изв. Сам. науч. центра РАН. 2011. Т. 13. № 1–8. С. 1837–1840.

46. Jones B.F., Naftz D.L., Spencer R.J., Oviatt C.G. Geochemical evolution of great Salt Lake, Utah, USA. Aq. Geoch., 2009, vol.15, pp. 95–121. DOI: 10.1007/s10498-008-9047-y.

Поступила в редакцию / Received 01.05.2026
Принята к публикации / Accepted 17.06.2026

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Червяцова Ольга Яковлевна, научный сотрудник, государственный природный биосферный заповедник «Шульган-Таш», Республика Башкортостан, Россия; SPIN-код: 8161-8031, ORCID: 0000-0001-5240-9818, ResearcherID AAR-3404-2021, AuthorIDScopus: 57131106900; e-mail: kittary@yandex.ru.

Казадаев Дмитрий Сергеевич, аспирант, Тольяттинский государственный университет, Тольятти, Россия; e-mail: chinon@yandex.ru.

Киселева Дарья Владимировна, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией, Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия; SPIN-код: 9965-3014, ORCID: 0000-0002-8682-1541; e-mail: kiseleva@igg.uran.ru.

Окунева Татьяна Геннадьевна, младший научный сотрудник, Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия; SPIN-код: 9804-0385; e-mail: okunevatatjana@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Olga Y. Chervyatsova, researcher, "Shulgan-Tash" State Natural Biosphere Reserve, Russia; SPIN-code: 8161-8031, ORCID: 0000-0001-5240-9818, ResearcherID AAR-3404-2021, AuthorIDScopus: 57131106900; e-mail: kittary@yandex.ru.

Dmitry S. Kazadaev, postgraduate student, Togliatti State University, Togliatti, Russia; e-mail: chinon@yandex.ru.

Daria V. Kiseleva, Ph.D. (Geology and Mineralogy), head of the laboratory, Academician A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia; SPIN-code: 9965-3014, ORCID: 0000-0002-8682-1541; e-mail: kiseleva@igg.uran.ru.

Tatyana G. Okuneva, junior researcher, Academician A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia; SPIN-code: 9804-0385; e-mail: okunevatatjana@mail.ru.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

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

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

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

Общие требования к оформлению статьи:

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

Титульная страница должна содержать следующие элементы:

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

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

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

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

Единицы измерения по тексту статьи указываются в международной системе единиц.

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

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

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

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

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

Форматы оформления основных видов затекстовых библиографических ссылок:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

AUTHOR GUIDELINES

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

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

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

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

The general format requirements for articles to be published:

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

The title page should contain the following elements:

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

The main text.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Some formats for references list:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Научное издание

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

Главный редактор: академик РАН Г.И. Долгих
Компьютерная верстка: О.Ю. Круковская
На обложке фото В.А. Обязова,
рисунки О.Ю.Круковской
Подписано в печать 10.08.2026. Формат: 60x84/8
Бумага: офсетная. Печать плоская Усл. печ. л. 19,2. Тираж 50 экз. Заказ № ____
Выход в свет 10.08.2026
Тип распространения: бесплатно на сайте журнала www.hydro-sphere.ru

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

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





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