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

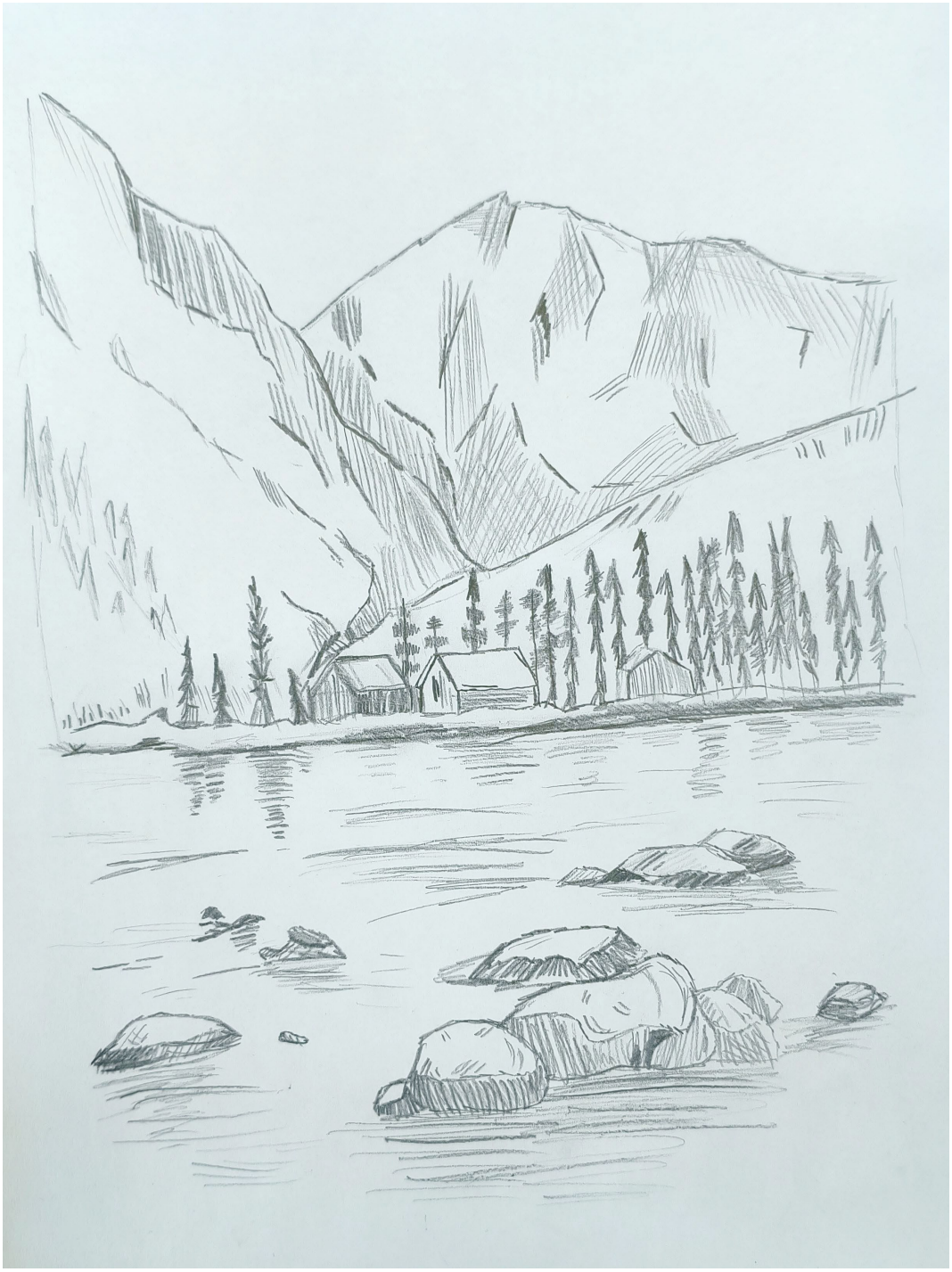
ГИДРОСФЕРА
ОПАСНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ

HYDROSPHERE
HAZARD PROCESSES AND PHENOMENA

www.hydro-sphere.ru



2025 Том 7 Выпуск 3



ГИДРОСФЕРА. ОПАСНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ

Том 7, Выпуск 3

Выходит 4 раза в год

ISSN 2686-7877 (print)

ISSN 2686-8385 (online)

Учредитель журнала

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

Главный редактор

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

Заместители главного редактора

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

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

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

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

Ответственный секретарь

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

HYDROSPHERE. HAZARD PROCESSES AND PHENOMENA

Volume 7, Issue 3

Issued 4 times per year

ISSN 2686-7877 (print)

ISSN 2686-8385 (online)

Founder

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

Editor-In-Chief

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

Deputy Editor-In-Chief

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

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

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

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

Executive Editor

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

Редакционный совет

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

Editorial Council

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

Редакционная коллегия

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

Editorial Board

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

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

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

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

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

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

Технический редактор

Информацию о принятых в печать материалах можно получить на сайте журнала или у технического редактора **Круковской Ольги Юрьевны**, 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 **Olga Krukowskaya**.
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

О специальном выпуске журнала по результатам Международной научно-практической конференции памяти выдающегося русского гидролога Юрия Борисовича Виноградова «VI Виноградовские Чтения. Гидрология нового поколения» 230

Оценивание лавинной опасности при инженерных изысканиях П.А. Черноус 232

Исследование селевых процессов на территории городского округа «Город Южно-Сахалинск» С.В. Рыбальченко 242

Значение крупных и субмикронных коллоидов в миграции химических элементов и оценке качества речных вод Дальнего Востока России В.М. Шулькин. 259

Продление гидрологических рядов дендрохронологическими реконструкциями на примере тополя черного и ивы белой в Западной Сибири М.А.Гурская, Л.И. Агафонов, М.О.Ермоленко 274

Статистические аспекты оценки определения расходов воды химическим методом Т.Н. Синцова, А.П. Лепихин 286

НАУЧНЫЕ ДИСКУССИИ 296

Предисловие от редакции к статье А.А. Возняк. К вопросу корректировки нормативных документов по определению основных гидрологических характеристик 296

К вопросу корректировки нормативных документов по определению основных гидрологических характеристик А.А. Возняк 297

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ 304

CONTENTS

About the Special Issue of the Journal Based on the Results of the International Scientific Conference in Memory of Outstanding Russian Hydrologist Yury Vinogradov "VI Vinogradov Conference: Future Generation Hydrology" 230

Assessment of Avalanche Hazard in Engineering Surveys. Standards and Reality Pavel A.Chernous 232

Investigation of Debris Flow Processes in the Territory of the Yuzhno-Sakhalinsk City District Svetlana V. Rybalchenko 242

The Importance of Coarse Colloids in the Migration of Chemical Elements and the Assessment of the Quality of River Waters in the Russian Far East Vladimir M. Shulkin 259

Prolongation of Hydrological Rows of Water Levels and Discharge Using Dendrochronological Reconstructions on Example of Black Poplar and White Willow in Western Siberia Marina A. Gurskaya, Leonid I. Agafonov, Maxim O. Yermolenko..... 274

Statistical Aspects of the Assessment Water Discharge Using the Tracer Dilution Method Tatyana N. Sintsova, Anatoly P. Lepikhin..... 286

SCIENTIFIC DISCUSSIONS 296

Editor's Foreword to the Article Anna A. Wozniak: On the Issue of Adjusting Regulatory Documents for Determining the Main Hydrological Characteristics..... 296

On the Issue of Adjusting Regulatory Documents for Determining the Main Hydrological characteristics Anna A. Wozniak 297

AUTHORS GUIDELINE 304

О специальном выпуске журнала по результатам Международной научно-практической конференции памяти выдающегося русского гидролога Юрия Борисовича Виноградова «VI Виноградовские Чтения. Гидрология нового поколения»

Международная научно-практической конференция «Виноградовские Чтения» организуется учениками и продолжателями идей выдающегося российского гидролога Юрия Борисовича Виноградова. Впервые мероприятие состоялось в 2013 году и проводится регулярно каждые два года.

Чтения традиционно собирают ученых со всех регионов России и мира, работающих в области гидрологии и изучения водных ресурсов. Конференция служит открытой площадкой для научных обсуждений проблем гидрологии, поиска путей их решения, а также интеграции современных методов исследования гидрологических процессов применительно к фундаментальным и прикладным задачам.

Шестые Виноградовские Чтения «Гидрология нового поколения» прошли 13–19 октября 2025 года на базе Санкт-Петербургского государственного университета и Государственного гидрологического института. В 2025 году участие в конференции приняли более 250 ученых из России (Алтайский край; Белгородская область; Воронежская область; Иркутская область; Красноярский край; Магаданская область; Москва; Московская область; Мурманская область; Оренбургская область; Пермский край; Приморский край; Республика Бурятия; Республика Саха; Республика Тыва; Ростовская область; Самарская область; Санкт-Петербург; Ленинградская область; Сахалинская область; Свердловская область; Томская область; Хабаровский край; Ханты-Мансийский автономный округ; Челябинская область; Ямало-Ненецкий автономный округ; Ярославская область), а также Беларуси, Китая, Ирана, ЮАР и Германии (онлайн).

Работа конференции проводилась по следующим научным направлениям:

1. Методы гидрологических расчетов, моделирования и прогнозирования;
2. Закономерности гидрологических процессов, гидрологические последствия изменений климата;
3. Исследования качества вод и экологического состояния водных объектов
4. Опасные гидрологические явления;
5. Методы и средства гидрологического мониторинга;
6. Дистанционное зондирование и геоинформационные системы в гидрологических исследованиях;
7. Эрозионные и русловые процессы;
8. Гидрология в Антарктиде: семьдесят лет отечественных исследований;
9. Круглый стол «Проблемы высшего образования в сфере гидрологии и пути их решения»;
10. Круглый стол «Проблемы гидрологических изысканий».

На Чтениях были представлены 16 пленарных, 202 устных и 51 стендовый доклад. В 2025 г. в программу конференции также вошли такие события, как Школа гидрологического моделирования, посещение могилы Ю.Б. Виноградова, футбольный турнир, дружеский ужин и танцы под живую музыку, экскурсии на Главную экспериментальную базу ГГИ, а также обзорные экскурсии по г. Санкт-Петербургу для иностранных коллег.

По результатам работы конференции составлен специальный выпуск журнала «Гидросфера. Опасные процессы и явления». Этот номер издания включил важные научные работы и практические рекомендации не только

в области изучения опасных гидрологических явлений (статьи Рыбальченко С.В. «Исследование селевых процессов на территории городского округа "Город Южно-Сахалинск”»; Черноус П.А. «Оценивание лавинной опасности при инженерных изысканиях. Нормативы и реальность»), но и в области исследования качества вод и экологического состояния водных объектов (статьи Шулькин В.М. «Значение крупных и субмикронных коллоидов в миграции химических элементов и оценке качества речных вод Дальнего Востока России»; Синцова Т.Н., Лепихин А.П. «Статистические аспекты оценки определения расходов воды химическим методом»), изучения закономерностей гидрологических процессов, развития методов моделирования, гидрологических расчетов и прогнозирования (статьи Возняк А.А. «К вопросу корректировки нормативных документов по определению основных гидрологических характеристик»; Гурская М.А., Агафонов Л.И., Ермоленко М.О. «Продление гидрологических рядов дендрохронологическими реконструкциями на примере тополя черного и ивы белой в Западной Сибири»).



Совместное фото участников конференции
«VI Виноградовские Чтения. Гидрология нового поколения»

О.М. Макарьева, Н.В. Нестерова
Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург Россия

Научная статья / Scientific paper
УДК: 551.578.483
DOI: 10.34753/HS.2025.7.3.232

Оценивание лавинной опасности при инженерных изысканиях. Нормативы и реальность

П. А. Черноус
Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск, Россия
e-mail: pchernous48@gmail.com

Аннотация. Рассматриваются эмпирические и физически обоснованные модели возникновения и движения снежных лавин, а также их различные практические реализации. Показано, что общим недостатком нормативных методик оценивания характеристик лавинной опасности является отсутствие указаний об оценке точности получаемых результатов. Основной проблемой, препятствующей получению надежных характеристик лавинной опасности, является редкость самих событий схода лавин, короткие ряды наблюдений за ними и отсутствие надежных физически обоснованных интегрированных моделей возникновения и движения лавин. В связи с этим представляется, что нормативные требования, касающиеся получения значений этих характеристик заданной обеспеченности являются недостаточно обоснованными. Завышенными также являются требования учета влияния некоторых факторов (например, климатических) на характеристики лавинной активности в районе изысканий. Указаны основные недостатки действующих нормативных документов, которые необходимо исправить. Даны предложения для приведения нормативных документов в соответствие с современным уровнем знаний о снежных лавинах.

Ключевые слова: лавинная активность; опасные характеристики; методы оценивания; надежность; нормативы.
Для цитирования: Черноус П.А. Оценивание лавинной опасности при инженерных изысканиях. Нормативы и реальность // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2025. Т. 7. Вып. 3. С. 232–241. DOI: 10.34753/HS.2025.7.3.232.

Assessment of Avalanche Hazard in Engineering Surveys. Standards and Reality

Pavel A. Chernous
Special Research Bureau for Automation of Marine Researches FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia
e-mail: pchernous48@gmail.com

Abstract. The article reviews empirical and physically based models of snow avalanche occurrence and movement, as well as their various practical implementations. It is shown that the general shortcoming of regulatory methods for assessing avalanche hazard characteristics is the lack of guidelines for assessing the accuracy of the results obtained. The main problem to obtaining reliable avalanche hazard characteristics is the rarity of avalanche events, the limited length of observational records, and the lack of robust, physically based comprehensive models of avalanche release and motion. In this regard, it seems that regulatory requirements for obtaining the values of these characteristics of a given probability are insufficiently substantiated. The requirements for taking into account the influence of certain factors (e.g., climatic) on the characteristics of avalanche activity in the survey area are also overly demanding. The main shortcomings of current regulatory documents that need to be corrected are identified. Proposals are provided for updating regulatory documents in line with the current level of knowledge about snow avalanches.

Keywords: avalanche activity; hazard characteristics; methods of assessment; reliability; standards.
For citation: Chernous P.A. Assessment of Avalanche Hazard in Engineering Surveys. Standards and Reality. Hydrosphere. Hazard processes and phenomena, 2025, vol. 7, iss. 3, pp. 232–241. DOI: 10.34753/HS. 2025.7.3.232. (In Russian; abstract in English).

Введение

Возможное негативное влияние снежных лавин на объекты строительства пытались учитывать достаточно давно. Но научно обоснованные методы, учитывающие это влияние, стали появляться лишь в XX веке по мере появления научных знаний о лавинах и формирования нового научного направления – лавиноведения. Одновременно формировались и нормативные требования к проведению изысканий и их результатам. В СССР во второй половине XX века появились два общегосударственных документа содержащих такие требования: ВСН 02-73 «Указания по расчёту снеголавинных нагрузок при проектировании сооружений»[1] (далее ВСН) и СН 517-80 «Инструкция по проектированию и строительству противолавинных защитных сооружений»[2] (далее СН), которые некоторое время действовали совместно. Имелись и ведомственные документы, которые использовались при проектировании сооружений в лавиноопасных зонах. В 2018 г. был утвержден новый нормативный документ «Инженерные изыскания для строительства в лавиноопасных районах. Общие требования. Свод правил» – СП 428.1325800.2018[3] (далее – СП), позволяющий использовать изложенные в нем методики для оценки лавинной опасности. Другие методики также допустимы, но лишь после обоснования их применимости в условиях сходных с условиями проведения изысканий. К сожалению, возможности выбора методик, дающих наилучшие результаты, путем сравнения результатов расчетов по ним, с результатами натурных наблюдений за лавинами очень ограничены. В России есть возможности для таких сравнений лишь для дальности выброса лавин. Сравнение семи различных методик определения дальности выброса в Хибинах [1] показало большие различия в их точности. При максимальной фактической дальности выброса (по проложению) лавины 1040 м, расчетные ее значения по различным методикам оказались в диапазоне от 960 м до 1,5 км. Это привело автора исследования к логичному выводу о невозможности создания универсальной методики определения характеристик лавин. Авторы СП попытались учесть новые знания о лавинах, полученные после выпуска ВСН и СН, и изменения в законодательстве[4], произошедшие за этот период. Основные методы расчетов, представленные в СП, взяты из работ [2–5] и предыдущих нормативных документов. Их обоснованность в некоторых случаях оставляет желать лучшего. Как показывает практика, выполнение нормативных требований далеко не всегда позволяет избежать ущерба от лавин.

Сейчас при проведении инженерных изысканий требуется оценить возможные геометрические (границы распространения, дальности выброса, высоты фронта) и динамические (скорости, динамические давления) характеристики лавин, а также их вероятности. Целью настоящей работы является анализ научно обоснованной применимости действующих нормативных расчетных методов оценки лавинной опасности при инженерных изысканиях, а также рассмотрение возможностей их актуализации.

Основные недостатки СП

Неопределенность некоторых понятий, используемых в снеголавинных расчетах. Например, в СП фигурирует максимальная годовая высота снежного покрова в лавинном очаге, м – h_i, но как она должна определяться и с какой точностью ничего не сказано. Очевидно, что в различных местах лавинного очага максимальная годовая величина высоты снежного покрова может различаться на порядки.

[1] Указания по расчёту снеголавинных нагрузок при проектировании сооружений. ВСН 02-73. Москва: Гидрометеоиздат, 1973. 22 с.
[2] Инструкция по проектированию и строительству противолавинных защитных сооружений. СН 517-80. Москва: Стройиздат, 1980. 15 с.
[3] Инженерные изыскания для строительства в лавиноопасных районах. Общие требования. Свод правил. СП 428.1325800.2018. Москва.: Изд-во Минстроя России, 2018. 58 с.
[4] Федеральный закон от 30.12.2009 № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений»

Например, в лавинных очагах, контролируемых центром лавинной безопасности АО «Апатит» площадью от нескольких гектаров до десятков гектаров, обычно устанавливалось от одной до десяти – двенадцати трехметровых снегомерных реек. Обычно рейки устанавливались по обеим сторонам от тальвега лавинного очага на значительном расстоянии от него. Связано это с тем, что высота снега вдоль тальвега всегда существенно больше, чем по краям воронки или вреза и рейки, установленные там, заносятся снегом в первые месяцы зимы. Даже при такой установке, во многих лавинных очагах в течение зимы высота снега превышает 3 м. Какая при этом максимальная годовая величина снежного покрова в лавинном очаге сказать невозможно. Цена деления снегомерной рейки 0,5 м, а отсчеты по ней делаются с помощью бинокля с расстояний от нескольких сотен метров до двух километров и даже несколько более. Случайная ошибка таких измерений составляет 0,2–0,3 м. В горах Средней Азии устанавливались рейки с ценой деления 0,1 м, и случайная ошибка измерений по ним была не меньше 5 см. Про то, какова должна быть сеть точечных измерений для определения h_i с заданной точностью, в СП не говорится. В любом случае она будет меньше. Не сказано о том, сколько лет надо вести наблюдения за высотой снежного покрова в лавинном очаге для получения средней многолетней величины максимальной за год высоты снежного покрова h_m. Не говориться и о том, как влияет продолжительность периодов, для которых вычисляются h' и h'' – средние из максимальных годовых значений высоты снежного покрова соответственно в зоне зарождения и на опорном пункте наблюдения, на основании которых и h_{on} – максимальной высоты снежного покрова заданной вероятности превышения на опорном пункте наблюдения, рассчитывается h_n – максимальная высота снежного покрова заданной обеспеченности n в зоне зарождения лавин (1).

$$h_n = h_{\text{оп}} \frac{h'}{h''}, \qquad (1)$$

По крайней мере, метод определения h_i и h_m должен быть таким же, как они получалась при разработке представленной в СП методики оценки характеристик лавинной активности. Как это должно делаться в СП ничего не говориться. Поскольку h_i и h_m являются первичными данными, на которых строятся оценки лавинной активности, важно знать их точность и их влияние на качество этих оценок. Эти же замечания относятся к определению h_m по сумме твердых осадков на уровне верхней границы лавинного очага, мм – W с помощью формулы (2).

$$h_m = \frac{W^{0,8}}{100}, \qquad (2)$$

Определяемая по климатическому справочнику путем интерполяции величина W также нуждается в оценке точности. Приведенная в СП зависимость (3) σ_h – среднего квадратического отклонения значений максимальной за год высоты снежного покрова от h_m, ошибочна. Возможно, это опечатка.

$$\sigma_h = \frac{h_m^{0,75}}{100}, \qquad (3)$$

Большинство эмпирических зависимостей в СП представлены, как универсальные, хотя на самом деле таковыми не являются. Если представить лавинопроявление, как случайное явление, то для каждого лавиносбора существуют свои распределения вероятностей, характеристик лавин, которые необходимо определять при инженерных изысканиях. Оценить их по имеющимся наблюдениям невозможно в силу редкости событий и коротких рядов наблюдений. Представление о необходимой длине ряда для получения надежных оценок повторяемости лавин с заданными характеристиками и возможностях их пространственных оценок можно получить, используя выражение (4) [6]:

$$E = 1 - [1 - (1/T)]^L, \qquad (4)$$

где: E – вероятность того, что лавина с заданной характеристикой (например, дальностью выброса достигающей определенной точки на местности) произойдет хотя бы один раз за период наблюдений (годы) L, T – период повторяемости лавин (годы) с заданной характеристикой в данном месте. Т.е. для того, чтобы быть уверенным на 90 % что зарегистрирована лавина с 1 % обеспеченностью ее характеристик

(повторяемостью 1 раз в 100 лет) необходимы тщательные непрерывные наблюдения за этими характеристиками в течение примерно 230 лет. Столетние наблюдения дают уверенность в этом лишь на 65 %. Но даже таких наблюдений нет.

В методике, используемой в СП для расчета объемов лавин различной повторяемости, такая оценка сделана путем объединения данных по различным лавиносборам в одну выборку. Она представляет лавинопроявление в некотором виртуальном лавиносборе, но совершенно не относится к лавиносбору для которого проводятся изыскания. Получаемые с помощью этой оценки обеспеченности различных объемов лавин в конкретном лавиносборе могут оказаться как завышенными, так и заниженными. Причем не известно на сколько. Кроме того, случайность самих событий лавинопроявления является допущением, которое трудно обосновать. В лавиноведении существуют такие понятия, как «регулярные лавины», которые образуются относительно часто и образование которых возможно описать, как случайное явление. По крайней мере для этого достаточно данных. Но есть и особенные, очень редкие и опасные «спорадические лавины» [7], которые под это описание не подходят. Возможно, термины для таких определений выбраны не самые удачные, но смысл, заложенный в них, именно такой.

Очевидно, что случайные ошибки h_m и σ_h при использовании статистического моделирования могут существенно влиять на результаты генерирования зим без лавин (с лавинами) и соответственно на распределения вероятностей (обеспеченностей) максимальных годовых объемов лавин. При моделировании эти ошибки не учтены. Роль рельефа в образовании лавин в таком подходе совсем не учитывается. При одинаковой h_m частота схода лавин в лавинных очагах различной крутизны может отличаться на 1–2 порядка. Большие различия можно ожидать в распределениях вероятностей возникновения лавин с максимальными годовыми объемами для лавинных очагов различной крутизны.

Для определения дальности выброса лавин существуют довольно много моделей и их программных реализаций [2, 3, 6, 8–12] Графоаналитический способ определения максимальной дальности выброса лавин, представленный в СП, является одним из вариантов простых и неплохо себя зарекомендовавших топографических моделей [3, 6, 8, 12], в котором дополнительно учитывается снегонакопление в лавинном очаге [2]. Но для определения скоростей и других характеристик лавин он не подходит. Трудно представить себе лавину в виде материальной точки, отрывающейся от верхней границы лавинного очага. Более правильно рассматривать движение центра массы оторвавшегося блока. Центр массы оторвавшегося блока всегда находится ниже границы лавинного очага, а останавливается он всегда выше нижней границы лавиносбора. Если представить движение *центра* массы с таким же коэффициентом эффективного сопротивления, который определен по данным о положении верхней и нижней точек лавины, то линия соединяющая центр массы в верхней и нижней частях лавины пройдет параллельно линии соединяющей верхнюю (О) и нижнюю (А) точки лавины, но несколько ниже (рисунок 1). Если согласно СП, скорость лавины v в произвольной точке B ее пути определяется с помощью выражения:

$$v = \sqrt{2g\Delta_{BC}}, \qquad (5)$$

а скорость движения центра массы выражением

$$v = \sqrt{2g\Delta_{BZ}}, \qquad (6)$$

где: g – ускорение свободного падения, Δ_{BC} и Δ_{BZ} – превышения так называемых энергетических линий над поверхностью земли в точке B (рисунок 1).

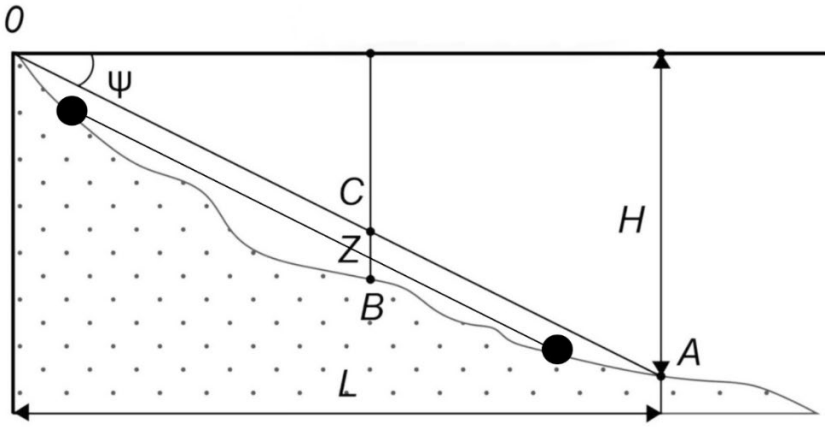


Рисунок 1. Схема для определения дальности выброса лавины и ее скорости графоаналитическим способом при различных положениях центра массы оторвавшейся снежной доски. Коэффициент общего сопротивления движению лавины, как он определен в СП – $r = tg\psi = H/L$

Figure 1. Diagram for determining the avalanche runout distance and velocity using a graphical-analytical method for various positions of the center of mass of a released snow slab. The overall avalanche resistance coefficient, as defined in the state code of regulations[3]

Соответственно, уменьшатся и расчетные скорости лавины. Насколько, ответить сложно, но можно констатировать, что предлагаемый в СП метод завышает скорость лавины и ее ударное давление.

Отдельно нужно сказать о построении профиля движения лавины. Он выбирается по карте изыскателем субъективно и обычно представляет собой в плане ломаную линию, состоящую из нескольких сегментов. Количество сегментов профиля не регламентировано. Это может быть источником разброса дальностей выброса лавин, определенных различными изыскателями. На точность определения дальности выброса и других характеристик лавинной активности, влияют также ошибки других входных данных, используемых в расчетах. Но в СП нет рекомендаций по оценке их влияния.

Некоторые характеристики лавиносборов плохо определены, что затрудняет их использование. Например, ничего не говорится о нижней границе «зоны транзита» и методах ее определения. В таблице для определения коэффициентов общего сопротивления движению текучей лавины r в качестве входного параметра используется «средняя крутизна зоны зарождения и транзита лавины». На самом деле ни о каком осреднении речь не идет. Этот параметр представляет собой крутизну прямой линии, соединяющей точку отрыва лавины и точку профиля склона, где крутизна склона становится меньше 20º. Методика выбора последней в СП отсутствует.

Ошибки определения параметров профиля рельефа, по которому двигалась лавина, с помощью топографических карт М 1:5000 и М 1:25000 представлены ниже. Считается что случайная ошибка положения точки на бумажной карте, находящейся в идеальном состоянии, равна 0,2 мм. Тогда случайные ошибки измерений горизонтальных расстояний (проложений) равны соответственно 1,4 м и 7 м, а для вертикальных расстояний 3,5–7 м. Для большинства лавин относительные ошибки определения $tg\psi = r$, по измерениям на карте, заключаются в диапазоне 1–8 %. Ошибки не очень большие. Гораздо более значительные ошибки связаны с нанесением лавин на карты. Как правило это делается глазомерно. В редких случаях, с помощью геодезической или барометрической съемок. Сейчас, в некоторых случаях необходимые морфометрические характеристики лавин можно определять с помощью спутниковых систем геопозиционирования, но в годы создания представленной в СП методики таких данных еще не было.

Ошибки определения $tg\psi = r$ также связаны с выбором пути лавины при построении профилей ее движения. На нанесенной на карту лавине можно выбрать множество профилей. Особенно

сложно это сделать в случаях, когда профили из верхней части лавиносбора сходятся в один в узкой части канализированного лавиносбора, а затем расходятся на конусе выноса в точке локальной омибиличности. Как это надо делать, в СП не говорится. Для оценки этого эффекта, сотрудниками лаборатории экзогенных геодинамических процессов и снежного покрова Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований ДВО РАН было выполнено независимое определение $tg\psi = r$ для 7 профилей одного из лавиносборов Сахалина. Получены следующие результаты: среднее значение $r_{cp} = 0{,}40$, стандартное отклонение $\sigma_r = 0{,}04$.

Оценки различий проложений одинаковых профилей на картах М 1:5000 и М 1;25000 с одинаковым количеством сегментов («эффект береговой линии») не превысили 1 %.

Учитывая вышеизложенное, точность представленных в СП значений $tg\psi = r$ существенно завышена. Третья значащая цифра после запятой не обоснована. Кстати, в предыдущих нормативных документах[1,2] в значениях $tg\psi = r$ она отсутствовала.

Плохо обоснованным выглядит положение о том, что если данные для определения дальности выброса лавин отсутствуют, то для расчета максимальной дальности выброса лавины следует использовать значение коэффициента общего сопротивления $tg\psi = 0{,}27$. В таблице, представленной в СП, встречаются значения меньше, а минимальное его значение равно 0,221.

Расчеты параметров характеристик пылевой лавины (непонятно, относится ли это к движению пылевого облака смешанной лавины, после остановки ее текучей части) выглядят довольно странно. Не определено, что является границей воздействия, хотя расчет ее положения приведен. Достоверность такой оценки вызывает вопросы. Это же можно сказать и о расчете скорости пылевой лавины, которая определяется лишь с помощью «среднего угла наклона лавиноопасного склона». Само понятие «лавиноопасный склон» не определено. Причем, согласно приведенной формуле, скорость пылевой лавины с увеличением крутизны склона уменьшается.

Требование учета изменения лавинной активности, связанные с изменением природных условий в период строительства и эксплуатации объекта, представляется выполнимым лишь частично. Например, когда предусмотрены техногенные изменения рельефа, характеристик подстилающей поверхности и растительности. Но оснований для надежного учета климатических изменений нет.

В последние годы при оценке лавинной опасности в инженерных изысканиях используется программный продукт RAMMS [9]. Его основу составляет двумерная модель движения текучей лавины в трехмерном рельефе. RAMMS удобен для пользователя и позволяет выполнить расчеты всех требуемых в СП характеристик. СП допускает использование других методов оценки лавинной опасности, не вошедших в СП, но лишь в местах с аналогичными природными условиями с местами, где их верификация была выполнена. Способы верификации методов и оценки сходства природных условий при этом не приводятся. С точки зрения верификации все используемые в России методики находятся примерно в одинаковом положении. Они прошли лишь авторскую проверку в очень ограниченном числе мест. Причем проверка проводилась лишь в отношении дальности выброса лавин. Случаев инструментального определения скоростей лавин в России всего несколько. Есть результаты измерений ударного давления лавин в одном из Хибинских лавиносборов в течение почти двух десятилетий, но параллельные измерения скоростей лавин там не проводились. О так называемой «воздушной волне» также очень мало данных натурных измерений. Измерения ее ударного давления и скоростей снеговоздушного потока проводились в Приэльбрусье в течение нескольких зим, но данных мало для построения надежной методики определения характеристик «воздушной волны». Достоверно даже не известны все механизмы ее образования. В России очень мало случаев инструментальных измерений Мест для инструментальной проверки надежности расчетных оценок скоростей, ударных давлений, размеров и некоторых других характеристик лавин в России нет.

Предложения по актуализации СП

Так как сроки актуализации СП не позволяют проводить длительные работы по созданию новых расчетных методов и их проверки в различных природных условиях, видимо придется использовать традиционные топографические модели. Для этого необходимо собрать случаи с хорошо задокументированными экстремальными лавинами в разных горных районах России. В Норвегии удалось восстановить дальности выброса лавин нескольких сотен экстремальных лавин за периоды от 100 до 300 лет по архивным отчетам местных органов власти, полиции, по церковным записям и др. [8]. В других европейских странах и в Канаде такие данные также были собраны [12–17]. Созданные с их помощью топографические модели определения экстремальной дальности выброса показали надежность сравнимую с современными двумерными гидравлическими моделями (таблица 1) [12].

Таблица 1. Результаты сравнения качества моделирования экстремальных лавин в 15 лавиносборах Норвегии [17]. *Храс* и *Хрег* – расчетные и зарегистрированные дальности выброса лавин
Table 1. Results of comparison of the extreme avalanche runout modelling quality for 15 Norwegian avalanche sites. *Храс* and *Хрег* – are calculated and recorded avalanche runout distances

Модель	Средние отклонения дальностей выброса (*Храс – Хрег)*/15, м	Средние абсолютные отклонения дальностей выброса (| *Храс – Хрег* |)/15, м	Коэффициенты корреляции	Стандартные отклонения,м
RAMMS	-63	78,6	0,961	122,6
Elba+	-125	131	0,958	165,8
Alpha-beta	17	133	0,944	153,8
Energy-Line	-47	92	0,947	128,9

Возможно, документальных данных о лавинах с такой редкой повторяемостью дальностью выброса окажется мало, тогда придется дополнять их данными надежно определенными другими методами, например фитоиндикационными.

Опыт определения параметров высотных профилей при создании топографической альфа-бета модели [7] может быть использован при актуализации СП. В ней профили аппроксимируются кривыми второго порядка в соответствии с оговоренными правилами. В этой модели в разных ее вариантах найдена корреляционная связь между коэффициентом общего сопротивления r и параметрами профиля. При этом ошибка r характеризуется ошибкой уравнения регрессии σ_r, связывающего r с параметрами профиля. Ошибки r приведены также в известной работе В. П. Благовещенского [2], но в действующий СП они не вошли.

Расчеты всех характеристик лавинной активности должны сопровождаться оценками точности их определения и надежности. В случае невозможности их получения, необходимо ориентироваться на самые неблагоприятные зарегистрированные варианты оцениваемых характеристик. Например, если речь идет о коэффициенте общего сопротивления или его аналогах, можно пользоваться его минимальным зарегистрированным значением.

При использовании статистического моделирования для оценки обеспеченности объемов лавин можно рекомендовать для разработки методики определения вероятности зим без лавин помимо высоты снега использовать данные о крутизне лавинного очага, а вместо неопределенной максимальной за зиму высоты снега использовать максимальную за зиму среднюю по площади высоту снега в лавинном очаге. Последняя является более устойчивой характеристикой. А при определении ее обеспеченности по данным опорной станции, желательно использовать также максимальные осредненные по площади (или профилю) данные снегосъемок.

Поскольку данные для проверки надежности обеспеченности большинства характеристик лавин в конкретном лавиносборе отсутствуют, возможно следует отказаться от их определения и ориентироваться на экстремальные значения.

Лучшим решением было бы включение в СП более сложных отечественных моделей возникновения и движения лавин и их программных реализаций (аналогичных AVAL-1D [10], RAMMS [9], SAMOS-AT [11] и др.), а также рекомендаций по выбору их параметров, подходящих для объектов изысканий. Особых сложностей для создания таких продуктов нет, и они могут быть созданы в рамках импортозамещения. Основная трудность заключатся в их калибровке и проверке достоверности. В России нет ни одного оборудованного полигона для инструментального определения таких характеристик движущихся лавин, как высота фронта, скорость, давление и другие. Сравнимое с указанными моделями качество определения дальностей выброса показывают более простые в применении топографические модели, но для определения других характеристик лавин они не применяются.

Если допустить использование моделей, созданных не для мест проведения изысканий, то надо представить в СП методику, подтверждающую соответствие условий изысканий условиям, в которых эти модели калибровались и верифицировались. Это требует новый ГОСТ[5], регулирующий правила составления сводов правил.

Заключение

Анализ действующего нормативного документа, регулирующего правила оценки лавинной опасности при инженерных изысканиях для строительства – СП, показал, что он не соответствует современным знаниям о лавинах и нуждается в актуализации. Причем, выполнение ряда требований, содержащихся в нем и других нормативных документах, не может быть надежно обеспечено на современном уровне знаний о лавинах.

Прежде всего это касается вероятностных оценок характеристик лавинной опасности (обеспеченностей). Физически обоснованные и эмпирико-статистические методы оценки лавинной опасности, основанные на детерминированных моделях, могут быть использованы, но лишь с указанием точности полученных оценок. Вероятностные оценки (обеспеченности) также могут быть использованы, но с соответствующим обоснованием их применения в месте проведения изысканий и возможными оценками надежности полученных результатов.

Отбор методов оценки лавинной опасности, включенных в актуализированный нормативный документ, должен проводится на основании сравнительной проверки их достоверности в различных условиях. Границы применимости этих методов должны быть указаны. Необходимо сформулировать общие требования к технологии и результатам такой проверки.

Важным остается вопрос о том, что делать с объектами, которые были спроектированы и введены в эксплуатацию на основании инженерных изысканий, выполненных по методикам предыдущих и уже не обязательных к применению нормативных документов. Это важно, поскольку существует возможность того, что для некоторой их части риск поражения, оцененный по новым более совершенным нормативным правилам, повысится. Возникает вопрос: нужны ли по этому поводу какие-нибудь добавления или изменения в нормативных документах?

Некоторые из высказанных замечаний и предложений могут показаться спорными, но по крайней мере могут служить предметом для их обсуждения в процессе подготовки актуализированного СП. Такое обсуждение уже ведется на сайте Лавинной ассоциации России (http://avalancheassociation.ru). Все желающие могут к нему присоединиться.

[5] ГОСТ Р 1.19-2023. Стандартизация в Российской Федерации. Своды правил. Правила построения, изложения, оформления и обозначения

Литература / References

1. Турчанинова А.С. Сравнительный анализ методик расчета динамических параметров снежных лавин при проведении инженерных изысканий // Геориск. 2012. №2. С. 32–36. https://www.geomark.ru/journals_list/zhurnal-georisk-22012/?attach=2062.
2. Благовещенский В.П. Определение лавинных нагрузок. Алма-Ата: изд-во «Гылым», 1991. 116 с.
3. Козик С.М. Расчет движения снежных лавин. Л.: Гидрометеоиздат, 1962. 74 с.
4. Божинский А.Н., Лосев К.С. Основы лавиноведения. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 276 с. Bozhinskiy A.N., Losev K.S. The Fundamentals of Avalanche Science. Publication No. 55 (Swiss federal Institute of Snow and Avalanche Research, Davos Dorf). 1998, 280 p.
5. Miklau F., Sauermoser S., Mears A. (Eds.) The Technical Avalanche Protection Handbook. Wilhelm: Ernst and Sohn, 2014. 433 p.
6. McClung, D.M., Schaerer, P.A. The Avalanche Handbook, third ed. Seattle, The Mountaineers Books, 2006. 117 p.
7. Гляциологический словарь. Ред. В.М. Котляков. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 528 с.
8. Lied, K., Bakkehøi, S., 1980. Empirical calculations of snow-avalanche run-out distance based on topographic parameters. J. Glaciol. 1980, 26 (94), pp. 165–177. DOI: 10.3189/S0022143000010704.
9. Christen M., Kowalski J., Bartelt P. RAMMS: numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain. Cold Regions Science and Technology. 2010. 63, 1–2, pp. 1–14. DOI: 10.1016/J.COLDREGIONS.2010.04.005.
10. Christen M., Bartelt P., Gruber U. AVAL-1D: An avalanche dynamics program for the practice International Congress INTERPRAEVENT 2002 in the Pacific Rim – Matsumoto, Japan. Congress publication. 2002. vol. 2, pp. 715–725. https://www.dora.lib4ri.ch/wsl/islandora/object/wsl:17895.
11. Sampl P., Granig M. Avalanche Simulation with SAMOS-AT. International Snow Science Workshop, Davos, Proceedings. 2009, pp. 519–523. DOI:10.3189/172756404781814780.
12. Haland G., Norem H. Orset K. I., Frekhaug M. H. An assessment of run-out models applied to extreme Norwegian snow avalanches. Proceedings, International Snow Science Workshop, Breckenridge, Colorado, 2016, pp. 165–172. https://arc.lib.montana.edu/snow-science/objects/ISSW16_O7.03.pdf.
13. Bakkehøi, S., Domaas, U., Lied, K. Calculation of snow avalanche runout distance. J. Glaciol. 1983, 4, pp. 24–29. DOI:10.1017/S0260305500005188.
14. Delparte, D.M., Jamieson, B., Waters, N. Statistical runout modeling of snow avalanches using GIS in Glacier National Park, Canada. Cold Reg. Sci. Technol. 2008, 54 (3), pp. 182–192. DOI:10.1016/j.coldregions.2008.07.006.
15. Furdada, G., Vilaplana, J., Statistical predication of maximum avalanche run-out distances from topographic data in the western Catalan Pyrenees. Ann. Glaciol. 1998, 26, pp. 185–288. DOI:10.1017/S0260305500007825.
16. Johannesson, T. Icelandic Avalanche Runout Models Compared with Topographical Models Used in Other Countries. Publ. Nor. Geotek. Inst. 1998, 203, pp. 43–52. https://ngi.brage.unit.no/ngi-xmlui/bitstream/handle/11250/3082420/JohannessonT%281998%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
17. Johnston, K.S., Jamieson, B., Jones, A. Estimating extreme avalanche runout for the Columbia Mountains and Fernie Area of British Columbia, Canada. Can. Geotech. J. 2012, 49 (11), pp. 1309–1318.

Поступила в редакцию / Received 20.11.2025
Принята к публикации / Accepted 09.12.2025

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Черноус Павел Александрович, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований Дальневосточного отделения РАН, г. Южно-Сахалинск, Россия, SPIN-код: 9801-3555, https://orcid.org/0000-0002-6006-5717, e-mail: pchernous48@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Pavel A. Chernous, Ph. D. (Geography), leading researcher, Special Research Bureau for Automation of Marine Researches of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, SPIN-code: 9801-3555, https://orcid.org/0000-0002-6006-5717, e-mail: pchernous48@gmail.com.

Научная статья / Scientific paper
УДК: 627.141.1
DOI: 10.34753/HS.2025.7.3.242

Исследование селевых процессов на территории городского округа «Город Южно-Сахалинск»

С. В. Рыбальченко
Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск, Россия
e-mail: rybalchenko_sv@mail.ru

Аннотация. В связи с активным освоением западного макросклона Сусунайского хребта (сведение лесной растительности, строительство газопроводов, горнолыжных трасс, профилирование склонов под различные линейные и капитальные сооружения), отмечается активизация опасных экзогенных геодинамических процессов в том числе и селевых потоков. В 2023 г. в результате выпадения обильных осадков произошло массовое селеформирование в пределах Сусунайского хребта. В черте г. Южно-Сахалинск отмечался выход наносоводных потоков рр. Уюновка, Рогатка, Еланька, Хомутовка, руч. Больничный, Складской и др. В связи с этим были выполнены комплексные исследования подверженности территории городского округа «Город Южно-Сахалинск» селевым процессам. Для выполнения работ были определены природно-территориальные условия селеформирования исследуемой территории, включая азональные факторы, такие как возможный высотный градиент осадков, определен селевой режим территории и антропогенное воздействие. По результатам рекогносцировочного обследования селевых бассейнов достоверно установлены следы селепрохождений и селевая опасность обследованных водосборов. Максимальные объемы селей, отмеченные в пределах исследуемой территории, колеблются в пределах от 5 000 м^3 до 200 000 м^3, средняя глубина селевых потоков 2–3 м, на отдельных участках стесненного русла и в особо крупных бассейнах может достигать 4–5 м. На основе действующих технических нормативов выполнен расчет параметров селевого стока и основных динамических характеристик формирующихся селевых потоков, определены селеопасные зоны и адресный перечень объектов, расположенных в селеопасных зонах. В селеопасной зоне расположено около 10 % селитебной территории г. Южно-Сахалинск (25,6 км^2), 3175 объектов жилой и промышленной застройки. Проанализированы существующие сооружения инженерной защиты, их эффективность и недостатки, включая конструктивные и объемно-планировочные решения, проанализирована схема застройки селитебной территории г. Южно-Сахалинска, разработана стратегия ее защиты и порядок (очередность) реализации.

Ключевые слова: селевой режим; Сахалин; селеопасные зоны; селитебная территория; наносоводный поток; грязекаменный сель.

Для цитирования: Рыбальченко С.В. Исследование селевых процессов на территории городского округа «Город Южно-Сахалинск» // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2025. Т. 7. Вып. 3. С. 242–258. DOI: 10.34753/HS.2025.7.2.242.

Investigation of Debris Flow Processes in the Territory of the Yuzhno-Sakhalinsk City District

Svetlana V. Rybalchenko
Special Research Bureau for Automation of Marine Researchers, Far East Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia
e-mail: rybalchenko_sv@mail.ru

Abstract. Due to the active development of the western macroslope of the Susunai range (reduction of forest vegetation, construction of gas pipelines, ski slopes, profiling slopes for various linear and capital structures), there is an intensification of dangerous exogenous geodynamic processes, including debris flows. In 2023, as a result of heavy precipitation, massive debris flows occurred within the Susunai range. Within the city

of Yuzhno-Sakhalinsk, low-density debris flow events were recorded on the Uyunovka, Slingshot, Elanka, and Khomutovka rivers, as well as on the Hospital and Warehouse streams. Therefore, comprehensive studies of the susceptibility of the territory of the Yuzhno-Sakhalinsk urban district to debris flow processes were conducted. As a part of this work, the natural and territorial conditions of the debris flow formation of the studied territory were determined, including azonal factors such as a possible high-altitude precipitation gradient, the debris flow regime of the territory and anthropogenic impact were determined. According to the results of the reconnaissance survey of debris flow basins, traces of debris flows and the debris flow hazard of the surveyed catchments have been reliably established. The maximum volumes of debris flows observed within the study area range from 5,000 m^3 to 200,000 m^3, the average depth of debris flows is 2–3 m, in some areas of a confined riverbed and in especially large basins it can reach 4–5 m. Based on the current technical standards, the calculation of the parameters of the debris flow and the main dynamic characteristics of the emerging mudflows was carried out, the debris flow-prone zones and the address list of objects located in debris flow -prone zones were determined. Approximately 10 % of the residential area of Yuzhno-Sakhalinsk (25.6 km^2), containing 3,175 residential and industrial buildings, lies within debris-flow-prone zones. The existing engineering protection structures, their effectiveness and disadvantages, including structural and spatial planning solutions, are analyzed, the scheme of development of the residential territory of Yuzhno-Sakhalinsk is analyzed, a strategy for its protection and the order (sequence) of implementation are developed.
Keywords: debris flow regime; Sakhalin land; debris flow-prone zones; residential areas; low-density debris flow; debris flow.
For citation: Rybalchenko S. V. Investigation of Debris Flow Processes in the Territory of the Yuzhno-Sakhalinsk City District. Hydrosphere. Hazard processes and phenomena, 2025, vol. 7, iss. 3, pp. 242–258. DOI: 10.34753/HS. 2025.7.3.242. (In Russian; abstract in English).

Введение

В связи с интенсивным освоением западного макросклона Сусунайского хребта, повреждением древесной растительности в результате ветровалов в 2014–2015 гг. в бассейнах рек, берущих свое начало в Сусунайском хребте, отмечается активизация опасных экзогенных геодинамических процессов, в том числе селевых потоков, создающих угрозу для территории города Южно-Сахалинска. В частности, при выпадении ливневых осадков 01.09.2023 отмечен массовый сход селевых потоков, как природного, так и антропогенного происхождения с выходом на территорию г. Южно-Сахалинск.

Для территории г. Южно-Сахалинск представляют опасность селевые потоки, формирующиеся в селевых бассейнах Сусунайского хребта: рр. Бурея, Еланька, Зима, Колка, Красносельская, Рогатка, Уюновка, Хомутовка, Христофоровка, ручьи Больничный и Складской (рисунок 1). Стоит отметить, что фактических данных о селях, сходивших в Сусунайском хребте, крайне мало. Вопросам развития и распространения селевых процессов на исследуемой территории посвящены отдельные работы Казакова Н.А., Жуковой З.И., Музыченко Л.Е., Казакова Е.Н., Генсиоров-ского Ю.В., Рыбальченко С.В., Куровской В.А. и др. [1–15].

Однако, работы по комплексной оценке подверженности селевым процессам наиболее опасной с точки зрения потенциального ущерба от селевых процессов территории городского округа (ГО) «Город Южно-Сахалинск», с использованием современных ГИС и инструментальных методов, действующих технических нормативов с последующей верификацией полученных расчетных данных на основе полевых материалов, собранных непосредственно после массового селепрохождения, с составлением подробных карт селевой опасности и адресного перечня объектов в форматах ГИС, выполнены для исследуемой территории впервые.

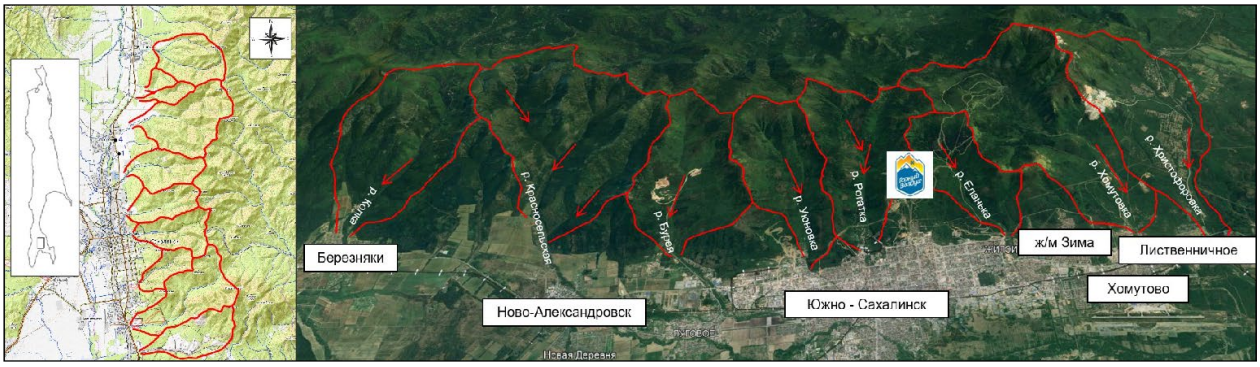


Рисунок 1. Схема участка работ (исследуемые селевые бассейны указаны красным контуром)
Figure 1. Diagram of the work site (the investigated debris flow basins are indicated by a red outline)

Цель работы: на основании научных разработок и материалов полевых работ, определить особенности и режим селевых процессов в речных бассейнах западного макросклона Сусунайского хребта, а также подверженность территории ГО «Город Южно-Сахалинск» селевым процессам.

Результаты работы позволят использовать подготовленные материалы для предотвращения потенциальной угрозы населению и объектам инфраструктуры от селевых процессов.

Материалы и методы исследования

В рамках работы был выполнен сбор, анализ и систематизация исходных данных по исследуемой территории в том числе в отношении материалов фондовых и архивных данных, научных публикаций по исследуемой территории, справочных сведений УГМС, результатов инженерных изысканий по объектам капитального строительства, расположенным в исследуемом районе, а также полевые работы и рекогносцировочное обследование селевых бассейнов и их морфодинамических зон.

В ходе сбора исходных данных были проанализированы представленные по запросу государственными и муниципальными Заказчиками материалы инженерно-гидрометеорологических и инженерно-геологических изысканий по исследуемому району. Были проанализированы материалы инженерных изысканий по 37 объектам, выполненные в период 2014–2023 гг. в исследуемом районе. При анализе данных материалов изысканий установлено, что на большинстве водотоков, несмотря на селеопасность района изысканий, специализированные изыскания по оценке селевой опасности не проводились. Оценка селевой опасности выполнена только для 4 объектов. Для остальных объектов в материалах инженерных изысканий формально указано, что сели не отмечены, что не соответствует фактическим данным и многочисленным зарегистрированным случаям селеформирования, а также противоречит материалам по оценке селевой опасности для указанных выше объектов, в отношении которых оценка селевой опасности проводилась. В проанализированных изысканиях значительно разнятся данные по принятым суточным максимумам осадков (мм), которые составляют 118–236 мм, при этом согласно данным таблицы 4.1 СП 131.13330.2018 «Строительная климатология»[1] суточный максимум осадков для территории г. Южно-Сахалинска составляет 131 мм.

Инженерно-геологические изыскания, выполненные по указанным объектам, позволили с достаточной вероятностью сформировать представление об инженерно-геологических условиях и геологической среде, вмещающей селевые бассейны.

[1] СП 131.13330.2018 «Строительная климатология» М., 2018

Гидрометеорологические и гидрологические аспекты природно-территориальных условий равнинных селитебных районов изучены достаточно хорошо на основе многолетних наблюдений на м/с «Южно-Сахалинск» и гидрологическом посту на р. Рогатка. Данные многолетних стационарных наблюдений дают общее представление о гидрологическом характере большинства водотоков западного макросклона Сусунайского хребта, что позволяет определять бытовые расходы водотоков и соответствующие им гидрологические характеристики.

Были выполнены работы по оценке влияния высотного градиента на суточные максимумы осадков, используемые для расчета параметров селевого стока. Фактическая оценка возможного высотного градиента суточных максимумов осадков была выполнена инструментальным способом посредством сети автоматических дистанционных осадкомеров. Сеть из 6 автоматических осадкомеров, установленных на различных гипсометрических уровнях в пределах водосборных бассейнов и водоразделов руч. Больничный и р. Еланька (абс. отм. 85, 92, 198, 280, 588, 740 м), была реализована на базе системы автоматического мониторинга «САМ-ГО», разработанной в ФГБУН «Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН». Оба водотока относятся к селеносным по фактически зарегистрированным случаям селепроявления и ущербам для селитебной территории.

На этапе сбора исходных данных были проанализированы научные работы по тематике селевой опасности в исследуемом районе. Несмотря на большой объем выполненных работ по изучению селевых процессов на территории Сахалина, современное состояние селевых бассейнов в Сусунайском хребте в полном объеме не исследовано, что не позволяет достаточно точно выполнить прогноз формирования крупных селевых потоков большого объёма, представляющих угрозу для исследуемой селитебной территории, а также определить параметры возможных селевых потоков и селевого стока.

Были проведены полевые работы и рекогносцировочное обследование селевых бассейнов: по характерным признакам (обитостям на деревьях, селевым отложениям, следам корразии и мобилизации четвертичных отложений) определены и координированы посредством GPS морфодинамические зоны селевых бассейнов, в том числе зоны зарождения, транзита и аккумуляции, селевые очаги, очаги твердого питания селей и участки прохождения послеселевого паводка, по высоте заплесков в отдельных морфостворах установлена высота прошедшей селевой волны, установлены и обмерены инструментально (посредством мерной рейки и лазерного дальномера) в части фракционного состава, в том числе отдельных селевых глыб и общего объема твердого выноса отложения селевых потоков 31.08 – 01.09.2023 г., а также отдельных наиболее крупных исторических селей, отложения которых были вскрыты селепрохождением в 2023 г. (рисунок 2).

Результаты исследования и их обсуждение

В геоморфологическом отношении территория городского округа «Город Южно-Сахалинск» расположена в долине р. Сусуя у подножия западного макросклона Сусунайского хребта. Рельеф территории крутосклонный, глубокорасчлененный с высокой потенциальной энергией. Глубина расчленения территории на отдельных участках превышает 600 м, естественная крутизна залесенных склонов долин рек и ручьев изменяется в пределах 15–25º и круче на отдельных участках. Несмотря на относительно небольшие гипсометрические уровни в условиях низкогорья, относительные превышения водоразделов над тальвегами обеспечивают формирование селей с высокими динамическими характеристиками.



Рисунок 2. Проведение рекогносцировочного обследования селевых бассейнов:
а) р. Уюновка. Июнь 2024 г., б) р. Рогатка. Июнь 2024 г.
Figure 2. Conducting a reconnaissance survey of debris flow basins: a) the Uyunovka River. June 2024,
b) Rogatka River. June 2024

В геологическом строении исследуемой территории принимают участие метаморфические породы красносельской свиты. Данные образования относятся к палеозой-мезозойскому зеленокаменному комплексу, в его составе преобладают хлорито-серицитовые окварцованные сланцы, также представлены кварциты и серпентиниты [16]. Породы относятся к устойчивым, очень прочным, образующим крутосклонные формы рельефа с глубокими горными врезами и бортами крутизной свыше 25°. При этом несмотря на широкое распространение относительно прочных горных пород, активные процессы выветривания и денудации приводят к повсеместному распространению раздельнозернистых или

слаболитифицированных четвертичных отложений различных генетических типов, которые и формируют селевые очаги и очаги твердого питания селей. Такое сочетание распространения различных по своей крепости горных пород приводит к формированию в верховьях водотоков консистентных связных грязекаменных селей со значительным содержанием каменно-глыбового материала, в среднем и нижнем течении несвязных наносоводных потоков с высокой транспортирующей способностью и обильным количеством влекомых глыб.

Территория также характеризуется значительным увлажнением, обусловленным геопространственным положением региона в переходной зоне «океан–материк» с интенсивной атмосферной циркуляцией и тепломассопереносом [17]. Для региона характерен муссонный климат и высокая циклоническая активность [18].

Учитывая определяющую роль суточного максимума осадков в расчете параметров селевого стока и характеристик русловых селевых потоков, в рамках данной работы выполнена оценка распределения осадков с учетом возможного влияния циркуляции атмосферы и высотного градиента распределения осадков. За период наблюдений сети в 2024 г. автоматических осадкомеров было зафиксировано 6 репрезентативных событий с фактически измеренным суточным максимумом осадков 19–56 мм. Наблюдения проводилось в благоприятный период года наибольшей циклонической активности. При этом в августе месячная сумма осадков по данным ГМС «Южно-Сахалинск» составила 248,2 мм[2] при среднем количество осадков за август 94 мм, что в 2,6 раза выше нормы. Таким образом можно сделать вывод о репрезентативности полученных данных автоматических осадкомеров за указанный период наблюдений. В таблице 1 приведены данные наблюдений осадкомеров и ГМС «Южно-Сахалинск» за 2024 г. Предполагалось, что в связи с наличием высотного градиента осадков суточные максимумы осадков, влияющие на параметры селей, будут значительно выше в горной местности с увеличением абсолютной высоты, однако данные наблюдений автоматических осадкомеров, представленные в таблице 1, свидетельствуют об отсутствии выраженного высотного градиента суточных максимумов осадков, а также влияния румбов господствующих ветров во время осадков в исследуемом районе (в период наблюдения отмечались румбы северных и южных направлений). При этом по данным многолетних стационарных наблюдений отмечена тенденция увеличения суммарного количества осадков с увеличением абсолютной высоты водосборной площади, однако эта тенденция отмечается только для длительных периодов наблюдений в течение периода (теплого/холодного) или года, что очевидно может быть обусловлено продолжительностью и частотой осадков.

При этом, учитывая, что сели относятся к краткосрочным явлениям, в отличие от паводков, и на основе действующих технических нормативов (Инструкция по определению расчетных характеристик дождевых селей ВСН 03-76…, 1976)[3] именно суточный максимум осадков установлен в качестве определяющего гидрометеорологического фактора для качественной и количественной оценки селевых процессов. В качестве суточного максимума осадков для расчетов параметров селевого стока и селевых потоков приняты фактически зарегистрированные исторические суточные максимумы осадков (по ГМС «Южно-Сахалинск» – 131 мм (2001 г.)).

[2] Официальный сайт «Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных (ВНИИГМИ-МЦД)» – http://meteo.ru [Электронный ресурс]

[3] Инструкция по определению расчетных характеристик дождевых селей ВСН 03-76. Л.: Гидрометеоиздат, 1976 г.

Таблица 1. Сравнительные данные автоматических осадкомеров (суточные максимумы осадков) за 2024 г.
Table 1. Comparative data from automatic precipitation gauges (daily precipitation maximums) for 2024

Дата явления (период наблюдений суточный)	ГМС «Южно-Сахалинск» (22 м)	руч. Больничный			р. Еланька		
		Осадкомер № 425 (92 м)	Осадкомер № 427 (280 м)	Осадкомер № 429 (588 м)	Осадкомер № 428 (85 м)	Осадкомер № 426 (198 м)	Осадкомер № 430 (740 м)
04.08	97,5	-	-	47,8	-	-	-
13.08	53,0	51,4	53,6	53,4	-	56,2	28,8
22.08	42,4	39,8	36,6	41,2	-	49,0	0
31.08	31,0	26,4	24,0	23,2	-	27,4	0
05.09	23,0	23,0	24,6	29,6	-	29,4	15,6
01.10	21,0	17,2	18,6	12,8	18,2	17,2	0,2
23.10	48,0	18,8	18,4	11,0	18,8	19,2	0,2

Геоботанические условия в значительной мере не препятствуют развитию селевых процессов, однако незначительно снижают их частоту. При этом за последние годы в связи с высокой антропогенной нагрузкой на горные и предгорные территории отмечается ухудшение геоботанических условий. Значительные объемы леса до 10 % от общей площади сведены под линейные и площадные объекты (дороги, инженерные коммуникации, горнолыжные трассы и канатные дороги, жилую застройку и др.), а также размещение участков горных работ (карьеры, породные отвалы), что приводит к увеличению склонового стока и активизации склоновых процессов.

В целом природно-территориальные геоморфологические условия района благоприятны для развития экзогенных процессов, в том числе селей различных структурно-реологических типов.

В рамках сбора исходных данных были выполнены полевые работы и рекогносцировочное обследование территории селевых бассейнов и предполагаемых участков воздействия селевых процессов. По результатам полевых исследований водотоков западного макросклона Сусунайского хребта, было установлено, что селевыми процессами затронуты все обследованные водотоки. Зоны зарождения селей преимущественно находятся на абсолютных отметках 300–900 м. Наиболее активными в селевом отношении являются верхние и средние части долин рек (горные и предгорные участки). В зоне транзита селевых потоков на участках подмываемых берегов и активных русловых деформаций происходит повторная активизация селевых процессов при развитии эрозионно-транспортного селевого процесса. На территории исследования выделяется основной генетический тип селей: дождевой. Типы селевых процессов: сдвиговый, эрозионно-сдвиговый и эрозионно-транспортный. Очаги твердого питания селей расположены на всем протяжении водотоков, за исключением устьевой части, которая зачастую значительно заболочена и заозерена. Структурно-реологические типы селей: формируются связные и несвязные селевые потоки (грязекаменные и наносоводные). Связные сели формируются в верховьях водотоков и проходят по их руслам от 0,1 до 4,0 км, после чего происходит отложение основной массы твердого материала и трансформация селей в наносоводные потоки.

По данным полевых работ можно говорить о том, что максимальные объемы селей, отмеченные и обмеренные инструментально (при помощи лазерного дальномера и геодезической рейки) в пределах исследуемой территории, колеблются в пределах от 5 000 м^3 до 200 000 м^3, средняя глубина селевых потоков 2–3 м, на отдельных участках стесненного русла и в особо крупных бассейнах может достигать 4–5 м.

Селевые отложения представлены глыбово-валунными и дресвяно-щебнистыми отложениями с супесчано-суглинистым заполнителем. Мощность селевых отложений за 1 явление составляет от 0,5 до 2 м. Помимо природных селей, в Сусунайском хребте зафиксировано формирование антропогенных селевых потоков, вызванных складированием отвалов пустой породы карьеров и выемок в зонах зарождения и транзита селей.

В рамках работы определен селевой режим исследуемой территории, что позволяет оценить вероятность негативных последствий сходя селевых потоков для селитебной территории. Селевой режим территории подразумевает пространственно-временную цикличность селевых процессов, зависимую от определённых природно-территориальных факторов или их комплекса, имеющих закономерность распространения и сочетание или же случайное распределение.

Для определения селевого режима исследуемой территории был использован метод зависимости между установленными случаями селеформирования и определяющими селеформирующими факторами. Поскольку селевые процессы в зависимости от типа селевого процесса: сдвигового, эрозионно-сдвигового или эрозионно-транспортного могут классифицироваться как экзогенные процессы водно-гравитационного или флювиального характера, в качестве рассматриваемых определяющих селеформирующих факторов приняты геологический и гидрометеорологический факторы.

Геологический фактор определяет скорость формирования потенциальных селевых массивов и очагов твердого питания селей. При этом цикличность геологического фактора сопряжена прежде всего со скоростью выветривания горных пород. Установлено, что при формировании склоновых связных грязевых и грязекаменных селей толщина горных пород, вовлеченных в сдвиговый селевой процесс на начальной стадии мобилизации селевого массива, соответствует мощности деятельного слоя сезонного замерзания-оттаивания (0,5–3,0 м), что подтверждает влияние цикличности геологического фактора на селевые процессы. При этом формирование потенциального селевого массива на глубину деятельного слоя в связи с широким распространением на территории Сахалина, в том числе в горной части, слабо литифицированных горных пород с низкими значениями физико-механическими свойствами, происходит уже в течение 2–3 лет. Стоит отметить, что данные сели отмечаются практически ежегодно, зачастую имеют небольшие объемы (первые десятки и сотни м^3), формируются при динамическом развитии небольших оплывин и вязкопластичных оползней.

Для антропогенных селей с породных отвалов формирование небольших селей отмечается ежегодно, однако это не имеет отношение к цикличности геологического фактора, поскольку техногенные грунты изначально обладают низким сцеплением при их слабой консолидации.

Формирование селей объемом свыше 1000 м^3, в том числе антропогенных, не имеет прямой зависимости от годовой цикличности геологического фактора, поскольку их частота формирования происходит значительно реже и зависит преимущественно от режима увлажнения территории, предшествующего увлажнения и выпадения селеформирующих суточных сумм осадков. При этом геологический фактор также опосредовано оказывает влияние на данные селевые процессы, поскольку после разгрузки селевых очагов и очагов твердого питания селей, требуется период формирования потенциальных селевых массивов.

В отличие от геологического фактора гидрометеорологический фактор на территории Сахалина имеет определяющую роль в формировании крупных селей, в том числе катастрофических. Для определения многолетних селеформирующих периодов, обусловленных гидрометеорологическим фактором и установления зависимости селевого режима от режима увлажнения территории первоначально были собраны данные о случаях селеформирования.

Результаты полевых исследований (в том числе, оценка возраста селевых отложений по результатам дендрохронологического анализа) и анализ архивных материалов показывают, что

грязекаменные и наносоводные селевые потоки формировались в Сусунайском хребте в 1875, 1924, 1928, 1930, 1944, 1947, 1955, 1964, 1970, 1981, 1987, 1992, 1993, 2001, 2002, 2003, 2009 и 2023 гг., выход селевых потоков на территорию города отмечался в 1875, 1930, 1947, 1981 и 2023 гг. [7, 15].

Для определения зависимости периодов массового селеформирования от цикличности гидрометеорологического фактора были проанализированы достоверно задокументированные случаи селеформирования и гидрометеорологические факторы, при которых они формировались (рисунок 3).

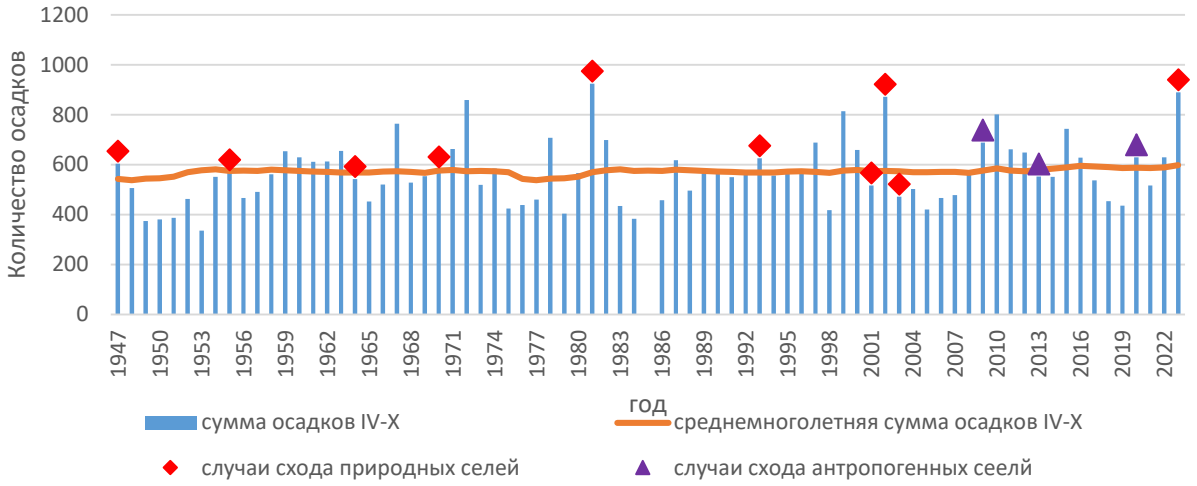


Рисунок 3. Суммы осадков теплого периода по ГМС «Южно-Сахалинск» и случаи схода селей в Сусунайском хребте за период 1947–2023 гг.

Figure 3. Precipitation totals of the warm period according to the Yuzhno-Sakhalinsk HMS and cases of debris flow in the Susunai range for the period 1947–2023

Согласно данным рисунка 3, периоды массового селеформирования достоверно коррелируются с периодами превышения среднемноголетней сумма осадков теплого периода (апрель–октябрь) по ГМС «Южно-Сахалинск», которая составляет 598 мм (по данным ВНИИГМИ МЦД на 2024 г.)[2]. Периоды массового переувлажнения территории отмечались в 1947, 1955,1967, 1971, 1972, 1981, 1982, 1987, 1999, 2009, 2010, 2012, 2015, 2016, 2020 и 2023 гг.

Таким образом, определяющую роль для селеформирования на исследуемой территории играют жидкие осадки, которые в рассматриваемом районе отличаются большой интенсивностью, что способствует формированию именно селей дождевого генезиса. На основе анализа многолетних наблюдений установлено, что селеобразующие суммы осадков в исследуемом районе составляют 50 мм за сутки (в зависимости от степени предшествующего увлажнения пород потенциальных селевых массивов) [4, 6]. За период 1947–2024 гг. по ГМС «Южно-Сахалинск» зафиксирован 61 случай выпадения осадков более 50 мм/сутки, в том числе 4 случая выпадения осадков более 100 мм/сутки: 16.09.1947 (106,7 мм), 05.08.1981 (115,5 мм), 23.08.2001 (131,4 мм), 01.09.2023 (104,2 мм).

Учитывая выявленную зависимость между периодами массового селеформирования, селевыми катастрофами и режимом осадков, полученные данные об исторических селях сверялись с данными о селеформирующих осадках. Период формирования катастрофических селей на исследуемой территории составляет раз в 40–50 лет (1875, 1947, 1981 и 2023 гг.) и соответствует прохождению интенсивных осадков 1–3 % обеспеченности, при обязательном предварительном увлажнении территории выше среднемноголетней суммы осадков для установленного периода. В среднем для селей на территории городского округа «Город Южно-Сахалинск» период селеформирования составляет раз в 5–7 лет, при выпадении селеформирующей суммы осадков интенсивностью 50 мм/сут и предшествующем увлажнении территории [4, 6].

Также стоит отметить, что предшествующее интенсивное увлажнение территории в теплый период года может приводит к формированию селей в течении нескольких лет подряд до полной разгрузки потенциальных селевых массивов, такие периоды отмечались в 1970–1972, 1981–1982, 2001–2003, 2009–2010 и 2023–2024 гг. Формирование мелких склоновых связных селей происходит ежегодно в связи с цикличностью геологического фактора: выветриванием горных пород на глубину сезонного деятельного слоя замерзания-оттаивания и формированием потенциальных селевых массивов.

Определение селеопасных зон, в том числе зон непосредственного воздействия селевых потоков и послеселевых паводков, является одной из приоритетных прикладных задач при определении селевой опасности речных бассейнов. Для определения селеопасных зон по заданным морфостворам, были выполнены расчеты основных параметров селевого стока и динамические характеристики формируемых селевых потоков 1 % обеспеченности, приведенные в таблице 2, в соответствии с действующими техническими нормативами ВСН 03-76 и ОДМ 218.2.052-2015.

Таблица 2. Динамические характеристики селевых потоков
Table 2. Dynamic characteristics of debris flows

Название водотока	Площадь водосбора, кв. км	Протяжённость, км	Уклон селевого русла, ‰	Максимальная глубина селевого потока 1% обеспеченности, м	Скорость селя 1% обеспеченности по ОДМ218.2.052-2015, м/с	Максимальная скорость селя 1% по ОДМ218.2.052-2015, м/с	Максимальный расход селевого паводка Q с вероятностью превышения 1%, м³/с	*Объем выноса твердых материалов за расчетный/инструментально измеренный максимальный сель, тыс. м3	Структурно-реологический тип селя	Тип селевого процесса	Тип селя	Тип ПСМ
р. Бурея	13,4	4,45	169	3,2	3,6	6,4	170,1	178,4/~160	несвязные, связные	сдвиговый, эрозионно-сдвиговый, эрозионно-транспортный	наносоводный, грязекаменный	накопления, обводнения
р. Еланька	5,09	1,83	279	3,3	4,0	7,1	148,1	64,7/~55				
р. Зима	2,03	2,39	175	1,35	2,8	5,0	31,2	13,4/-				
р. Колка	25,2	8	108	3,1	3,2	5,7	177,1	312,9/-				
р. Красносельская	29,9	8,8	105	3,23	3,3	5,9	196,9	384,3/-				
р. Пригородный	2,46	2,38	228	1,89	2,9	5,2	50,6	25,2/-				
р. Рогатка	16,1	4,19	199	4,5	2,3	4,1	226,3	229,1/~200				
р. Уюновка	14,9	6,23	153	3,2	3,4	6,1	169,5	249,9/~220				
р. Хомутовка	7,58	1,53	317	4,1	4,1	7,3	217,1	78,4/-				
р. Христофоровка	15,4	5,38	157	3,56	2,8	5,0	203,2	273,9/-				
р. Складской	2,62	1,76	55,5	2,1	2,7	4,8	90,2	33,5/-				
р. Больничный	2,29	1,01	79,9	2,0	2,8	5,1	104,3	24,8/-				

*Данные объема выноса твердых материалов за максимальный сель инструментально измеренные (тыс. м^3) приведены только для водотоков, на которых в рамках полевых работ были четко идентифицированы отложения исторических селей и границы их аккумуляции

Полученные данные по объему твердого выноса и селевым уровням сверялись с материалами рекогносцировочного обследования на предмет их репрезентативности и достоверности. Стоит отметить, что в условиях редкой повторяемости селей данные о фактических параметрах селевых потоков, полученные по материалам полевых работ, могут выступать только в качестве верификационных сведений.

На основе цифровой модели рельефа (ЦМР) и вычисленного значения наивысшего селевого горизонта определены зоны воздействия селевых потоков и послеселевых паводков – селеопасные зоны. Список объектов, расположенных в селеопасной зоне, определен на основе открытых картографических сервисов при наложении в цифровом формате селеопасных зон операторским методом. В селеопасной зоне расположено около 10 % селитебной территории города Южно-Сахалинск (25,6 км^2), 3175 объектов жилой и промышленной застройки.

В рамках проектных работ одной из основных задач является выбор стратегии инженерной защиты селитебной территории с учетом особенностей ее планировки и динамики селевых потоков.

Основным действующим техническим нормативом при создании инженерной защиты от селей в настоящий момент является СП 116.13330.2012 «Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов»[4]. Несмотря на то, что сели относятся к опасным гидрометеорологическим явлениям, вопросы инженерной защиты от данных процессов рассмотрены в указанном нормативе. Описание отдельных противоселевых сооружений также рассмотрены в ОДМ 218.2.052-2015 «Проектирование и строительство противоселевых сооружений для защиты автомобильных дорог»[5].

При разработке мероприятий по инженерной защите от селевых потоков был проанализирован имеющийся опыт проектирования, строительства и эксплуатации сооружений инженерной защиты для исследуемой территории или в аналогичных природно-территориальных условиях. В рамках данной работы были проанализированы существующие селезащитные сооружения на территории СТК «Горный воздух» возведенные в 2018–2024 гг. на рр. Хомутовка, Еланька, руч. Больничный и их притоках. Также были проанализированы существующие сооружения инженерной защиты на р. Рогатка в пределах селитебной территории. На основе проанализированного опыта строительства и эксплуатации сооружений инженерной защиты на территории ОАУ «СТК «Горный воздух», в том числе в условиях периода массового селеформирования, отмеченного на исследуемой территории в 2023 г. (формирование катастрофических селей редкой повторяемости 1–3 % обеспеченности за период эксплуатации сооружений не отмечено), можно сделать вывод об эффективности данных селепропускных сооружений и их стойкости к селевым процессам. Также высокой эффективностью обладают сооружения инженерной защиты русла р. Рогатка на участке ул. Комсомольская – Физкультурная. При этом сооружения инженерной защиты по р. Рогатка, расположенные ниже указанного участка, не обладают достаточной эффективностью поскольку не обладают достаточной пропускной способностью и селенаправлющими сооружениями в верхнем бьефе, что является существенным конструктивным недостатком. Для всех сооружений инженерной защиты стоит рассматривать комплексный подход к объемно-планировочным и конструктивным решениям, в том числе обустройство верхнего и нижнего бьефов для уравновешивания потоков, селенаправляющие сооружения в верхнем бьефе,

[4] СП 116.13330.2012 «Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов». М., 2013.
[5] ОДМ 218.2.052-2015 «Методические рекомендации по проектированию и строительству противоселевых сооружений для защиты автомобильных дорог» М., 2015.

в том числе с использованием существующего рельефа – земляных полотен автодорог и др., устройства гашения энергии потока, защита от подмыва сооружений («зуб» из скального негабарита или ГСИ, противоэрозионный фартук из ГСИ и др.). При этом стоит отметить относительно высокие капитальные вложения на строительство селепропускных сооружений, особенно на крупных водотоках с застройкой по обоим берегам, требующих строительства двухсторонних селепропускных и селенаправляющих сооружений.

Таким образом, на основе имеющегося опыта сооружений инженерной защиты на исследуемой территории, в качестве наиболее эффективного и при этом дорогостоящего мероприятия по инженерной защите от селевых процессов стоит рассматривать селепропускные и селенаправляющие сооружения. Реализация данных мероприятий наиболее целесообразна на участках русла с потенциально высоким ущербом для территории, значительно превышающим капитальные затраты на реализацию мер по инженерной защите. Реализация селепропускных сооружений также экономически целесообразна на относительно небольших водотоках, в том числе для защиты от повторной активизации селевых процессов на селитебной территории и активизации процессов русловых деформаций, при условии значительного превышения потенциального материального ущерба в сравнении с затратами на сооружение инженерной защиты.

При принятии решений по защите от селей стоит рассматривать вопрос комплексной инженерной защиты, в том числе от генетически родственных селям опасных экзогенных процессов: затопления, русловых деформаций, и рассматривать эффективность и экономическую целесообразность всей комплексной инженерной защиты.

Условно все потенциально защищаемые объекты и территории можно разделить на три группы по их значимости. В первую очередь определяются наиболее важные и первоочередные для защиты объекты и территории, к которым зачастую относятся объекты критической инфраструктуры, далее объекты наиболее крупной жилой, общественно-деловой и производственной застройки, а также территории их потенциального размещения в рамках градостроительной документации, в последнюю очередь рассматриваются рекреационные территории, объекты средней и мелкой производственной застройки, разреженной жилой застройки, малоэтажной, индивидуальной жилой и дачной застройки, территории сельскохозяйственного назначения и вся сопутствующая инфраструктура указанных менее приоритетных объектов, обладающих малой экономической эффективностью при реализации мер по инженерной защите. Комплексные мероприятия по инженерной защите территории и объектов рекомендовано реализовывать поэтапно в зависимости от значимости. При поэтапной реализации мер инженерной защиты в обязательном порядке проводится мониторинг и оценка эффективности реализуемых мероприятий с возможностью их дальнейшей доработки и корректировки в соответствии с требованиями СП 116.13330.2012 «Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов» к экспериментальным сооружениям.

Выбор типов защитных сооружений (селезадерживающих, селепропускных, селенаправляющих, стабилизирующих, селепредотвращающих, организационно-технических) выполняется на основе анализа положения защищаемого объекта или территории относительно морфодинамической зоны селевого бассейна, а также возможности и экономической целесообразности реализации объемно-планировочных и конструктивных решений на конкретном участке. Предпочтение также стоит отдавать сооружениям комплексной защиты, которые помимо селей защищают и от других опасных экзогенных процессов, например затопления и подтопления территории.

Для территории г. Южно-Сахалинска на основе выполненных работ предложена следующая стратегия инженерной защиты от селевых процессов (рисунок 4):

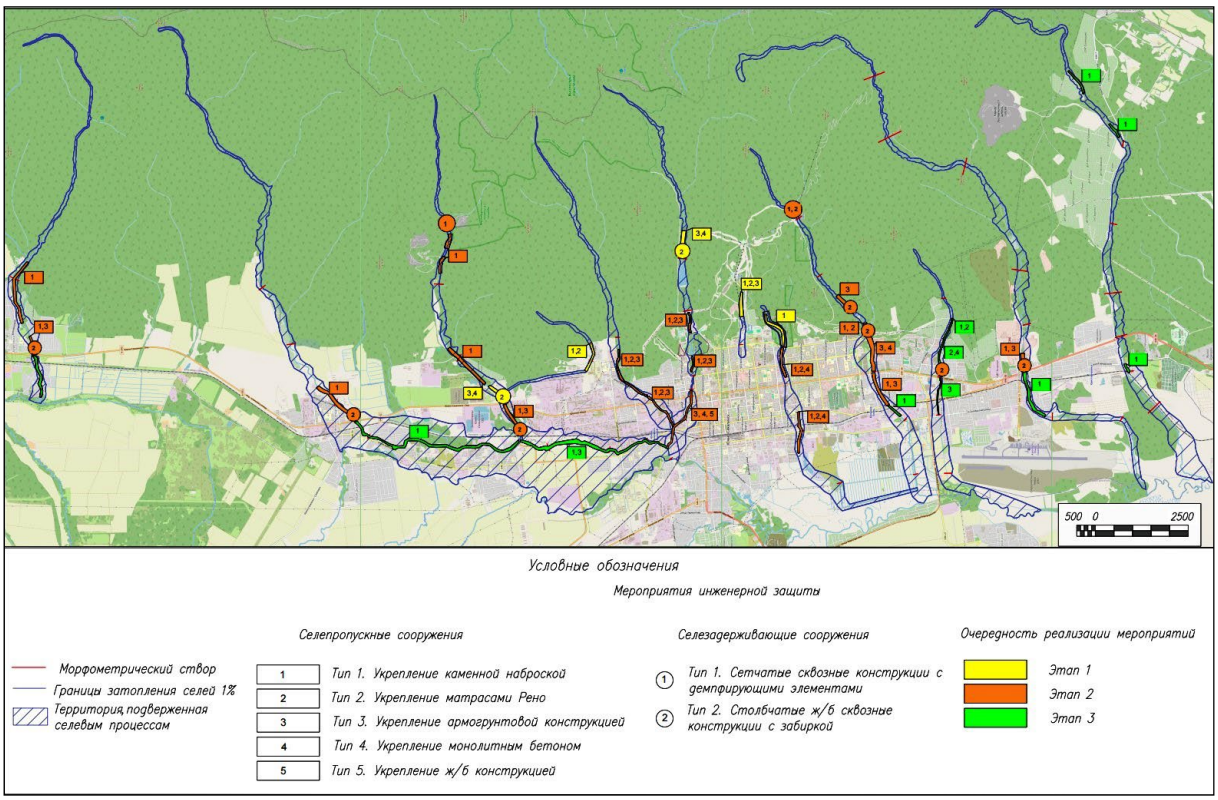


Рисунок 4. Мероприятия по инженерной защите от селевых процессов на территории г. Южно-Сахалинск

Figure 4. Measures for engineering protection against debris flow processes in the city of Yuzhno-Sakhalinsk

1) На горной территории, на участках движения консистентных грязекаменных селей, для защиты реализуемых крупных капитальных объектов туристической инфраструктуры и их вспомогательных объектов (канатных дорог, гостиниц, подстанций, автомобильных дорог, мостов и др.) при экономическом обосновании устройство селепропускных (в стесненных условиях) и селенаправляющих сооружений для защиты точечных объектов от селевых потоков, в том числе железобетонных или обетонированных армогрунтовых селепропусков или селенаправляющих дамб. При отсутствии экономической целесообразности изменение планово-высотного положения объектов за границами селеопасных зон. Реализация мероприятий инженерной защиты объектов выполняется в составе самих объектов.

2) В предгорной части, в местах преимущественной аккумуляции наносоводных селевых потоков, для защиты наиболее важных объектов критической инфраструктуры 1-ой группы значимости (автомобильных и железнодорожных мостов, ГТС питьевых водозаборов) устройство селезадерживающие сооружений в виде сквозных селеуловителей (сетчатых, столбчатых) для остановки твердой фазы селевого потока и осветления селя.

3) На равнинной части, на участках движения селевых паводков и возможной повторной активизации наносоводных селей при развитии эрозионно-транспортного селевого процесса, для объектов второй группы значимости стабилизирующие и селепредотвращающие сооружения в виде берегоукрепления железобетонных, армогрунтовых конструкций или каменной наброски из скального негабарита. Для объектов третьей группы укрепление русла из ГСИ и скального негабарита: только при условии комплексного благоустройства территории для целей рекреации или застройки.

Вне зависимости от группы значимости для всех селеносных русел рекомендован комплекс организационных мероприятий в виде расчистки русла и поймы от наносов, санитарные рубки деревьев для предотвращения карчеходов и заломов.

Выводы

На исследуемой территории городского округа «Город Южно-Сахалинск» определено наличие комплекса благоприятных для селеформирования природно-территориальных условий, включая геоморфологический, геологический, гидрометеорологический, геоботанический и антропогенный факторы.

В рамках работы было выполнено рекогносцировочное обследование селевых бассейнов Западного макросклона Сусунайского хребта, после периода массового селепрохождения 31.08 – 01.09.2023 с фиксацией прямых признаков и следов селепрохождений, отмечены отдельные параметры селевых потоков и селевого стока по прямым признакам. Собраны и проанализированы исходные данные по исследуемому району в части селевых процессов и селеформирующих факторов: архивные и фондовые данные, материалы стационарных наблюдений, научные публикации, материалы инженерных изысканий, результаты полевых работ.

На основе установленной зависимости между периодами массового селеформирования, селевыми катастрофами и режимом осадков, анализа фондовых данных о зарегистрированных селях, подтвержденными результатами рекогносцировочных обследований и методами дешифровки исторических селей, установлен селевой режим территории. В среднем для селей на территории городского округа «Город Южно-Сахалинск» период селеформирования составляет раз в 5–7 лет, при выпадении селеформирующей суммы осадков интенсивностью 50 мм/сут, и предшествующем увлажнении территории. Период формирования катастрофических селей на исследуемой территории составляет раз в 40–50 лет (1875, 1947, 1981 и 2023 гг.) и соответствует прохождению интенсивных осадков 1–3 % обеспеченности, при обязательном предварительном увлажнении территории выше среднемноголетней суммы осадков для установленного периода.

При помощи инструментального способа (измерений сети автоматических осадкомеров) на основе собранных и проанализированных данных, выявлено отсутствие выраженного высотного градиента суточных максимумов осадков на исследуемой территории. При этом фондовые данные подтверждают зависимость сумм осадков от гипсометрических уровней при более длительных периодах наблюдений (месячных, годовых).

На основе действующих технических нормативов и принятых методик для расчетных морфостворов определены параметры селевого стока и селевых потоков, селеопасные зоны.

На основе действующих технических нормативов выполнен расчет параметров селевого стока и основных динамических характеристик формирующихся селевых потоков. Полученные расчетным путем параметры селевого стока и динамические характеристики формируемых селевых потоков 1 % обеспеченности, подтверждены данными рекогносцировочного обследования в части отмеченных селевых уровней и объемов твердого стока, что подтверждает репрезентативность выполненных расчетов достаточных для дальнейшего определения селеопасных зон в пределах исследуемой территории. На основе ЦМР и вычисленного значения наивысшего селевого горизонта определены селеопасных зоны и адресный перечень объектов, расположенных в селеопасных зонах. В селеопасной зоне расположено около 10 % селитебной территории города Южно-Сахалинск (25,6 км^2), 3175 объектов жилой и промышленной застройки.

Проанализированы существующие сооружения инженерной защиты, их эффективность и недостатки, включая конструктивные и объемно-планировочные, проанализирована схема застройки селитебной территории г. Южно-Сахалинска, разработана стратегия ее защиты и порядок (очередность) реализации.

Благодарности

Представленные результаты получены при финансовой поддержке государственного задания FWWW-2025-0001.

Acknowledgements

The presented results were obtained with the financial support of the state assignment FWWW-2025-0001.

Литература / References

1. Генсиоровский Ю.В. Экзогенные геологические процессы и их влияние на территориальное планирование городов (на примере о. Сахалин): Автореф. дисс. …канд. геол.-мин. наук. Иркутск, 2011. 19 с.
   Gensiorovskii Yu.V. Exogenous geological processes and their influence on the territorial planning of cities (on the example of O. Sakhalin)]: Extended Abstract of PhD in Geology and Mineralogy. Irkutsk, 2011. 19 p. (In Russian).
2. Казаков Н.А. Жукова З.И. Районирование о. Сахалин по степени проявления селевой деятельности // Труды Гидрометцентра Сахалинского УГМС. Региональные исследования. 1988. С. 131–137.
   Kazakov N. A. Zhukova Z. I. Zoning of Sakhalin Island according to the degree of manifestation of mudflow activity. Proceedings of the Hydrometeorological Center of the Sakhalin UGMS. Regional studies. 1988. pp. 131–137 (In Russian).
3. Казаков Н.А. Массовое формирование селей в низкогорье о. Сахалин: условия и повторяемость. // Гидросфера. опасные процессы и явления. 2019. Т. 1. № 1. С. 14–30.
   Kazakov N.A. Mass Formation of Debris-flows in the Low Mountains of Sakhalin Island: Conditions and Repeatability. Hydrosphere. Hazard Processes and Phenomena, vol. 1, no.1, pp. 14–30. DOI: 10.34753/HS.2019.1.1.002 (In Russian, abstract in English).
4. Казаков Н.А., Генсиоровский Ю.В. Влияние вертикального градиента осадков на характеристики гидрологических, лавинных и селевых процессов в низкогорье. // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2007. № 4. С. 342–347.
5. Казаков Н.А., Генсиоровский Ю.В. Грязекаменные сели катастрофических объёмов в низкогорье острова Сахалин // Труды международной конференции «Селевые потоки: Катастрофы, риск, прогноз, защита», Пятигорск, 22–29 сентября 2008 г. С. 45–48.
6. Казаков Н.А., Минервин И.Г. Селевые процессы на о.Сахалин, // Прикладная геоэкология, чрезвычайные ситуации, земельный кадастр и мониторинг. 2000. Вып. 4. С. 35–38.
   Kazakov N.A., Minervin I.G. Mudflow processes on the islandSakhalin. Applied geoecology, emergencies, land cadastre and monitoring, Moscow: POLTEKS, 2000. vol. 4, pp. 35–38 (In Russian).
7. Казакова Е.Н. Повторяемость крупных грязекаменных селей в Сусунайском хребте по данным дендрохронологического анализа // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2009. № 3. С. 258–263.
   Kazakova E.N. Recurrence of large mudstone mudslides in the Susunai range according to dendrochronological analysis. Geoecology. Engineering Geology, hydrogeology, geocryology, 2009, no. 3, pp. 258–263 (In Russian).
8. Кузнецова М.Р., Пашовкина А.А., Генсиоровский Ю.В. Изменение характеристик максимального поверхностного стока и связанные с этим опасности для объектов инфраструктуры (на примере строительства биатлонного комплекса в г. Южно-Сахалинск) // Инженерные изыскания. 2019. Т. XIII. №1. С. 56–67.
   Kuznecova M.R., Pashovkina A.A., Gensiorovskij Yu.V. Changes in the characteristics of maximum surface runoff and related hazards to infrastructure facilities (on the example of the construction of a biathlon complex in Yuzhno-Sakhalinsk). Engineering Surveys, 2019, vol. XIII, no.1, pp. 56–67 (In Russian).
9. Куровская В.А., Виноградова Т.А., Васякина А.В. Моделирование паводков и наносоводных селей в бассейне реки Сусуя // Четвертые Виноградовские чтения. Гидрология от познания к мировоззрению. Сборник докладов международной научной конференции памяти выдающегося русского ученого Юрия Борисовича Виноградова. Санкт-Петербургский государственный университет. Санкт-Петербург, 2020. С. 307–312.

Kurovskaya V.A., Vinogradova T.A., Vasyakina A.V. Modeling of floods and mudslides in the Susuya River basin. The Fourth Vinogradov Readings. Hydrology from Cognition to Worldview. Collection of reports of the international scientific conference in memory of the outstanding Russian scientist Yuri Borisovich Vinogradov. St. Petersburg State University. St. Petersburg, 2020, pp. 307–312. (In Russian).

10 Музыченко А.А., Лобкина В.А., Генсиоровский Ю.В. Риски для городской инфраструктуры при строительстве горнолыжных курортов (на примере тор «Горный воздух» о. Сахалин). // В сборнике: Геология на окраине континента. 2019. С. 131–134.
Muzychenko A.A., Lobkina V.A., Gensiorovskij Yu.V. Risks to urban infrastructure during the construction of ski resorts (using the example of the Sakhalin Island Mountain Air project). In the collection: Geology on the Edge of the Continent, 2019, pp. 131–134. (In Russian).

11. Мусохранова Л.А., Генсиоровский Ю.В., Казаков Н.А. Уязвимость территории населенных пунктов Сахалинской области к воздействию опасных природных процессов и меры, принимаемые для ее защиты // Градостроительство. 2010. № 6. С.33–39.
Musokhranova L.A., Gensiorovskii Yu.V., Kazakov N.A. Vulnerability of the territory of Sakhalin Oblast settlements to the effects of dangerous natural processes and measures taken to protect it. Urban Planning, 2010, no. 6, pp. 33–39 (In Russian).

12. Отчет о работах селевого отряда по изучению селевых явлений о. Сахалин за 1983 г / Проблемная лаборатория снежных лавин и селей. Географический факультет МГУ. М.: 1984. 73 с.
Report on the work of the Sakhalin Island mudflow detachment for 1983. Problemnaya laboratoriya snezhnykh lavin i selei. Geograficheskii fakul'tet Moscow St. Univ. Publ. 1984. 73 p. (In Russian).

13. Рыбальченко С.В. Селевая опасность для населенных пунктов Сахалинской области. // ГеоРиск. 2013. № 3. С. 40–44.
Rybalchenko S. In the mudflow danger for settlements of the Sakhalin region. GeoRisk ,2013, no. 3, pp. 40–44.

14. Рыбальченко С.В. Проблемы рекультивации территории горнолыжных комплексов на примере СТК «Горный воздух» (Южно-Сахалинск) // Экологические системы и приборы. 2021. № 11. С. 12–23.
Rybal'chenko S.V. Problems of reclamation of the territory of ski resorts on the example of the STK "Mountain Air" (Yuzhno-Sakhalinsk). Environmental Systems and Devices, 2021, no. 11, pp. 12–23. (In Russian).

15. Рыбальченко С.В., Казакова Е.Н. Селевой режим территории городского округа «Город Южно-Сахалинск» // Экологические системы и приборы 2024. №8. С. 11–19.
Rybal'chenko S.V., Kazakova E.N. Mudflow regime in the territory of the Yuzhno-Sakhalinsk City district. Environmental Systems and Devices, 2024. no. 8. pp. 11–19 (In Russian).

16. Геология СССР, том 33. Остров Сахалин. / Под ред. В.Н. Верещагина. М.: Недра, 1970. 403 с.

17. Рыбальченко С.В. Особенности формирования селеопасных районов в переходных зонах «материк – океан» на примере о. Сахалин // Экологические системы и приборы 2023. №6. С. 74–83.
Rybal'chenko S.V. Features of the formation of mudflow-prone areas in the "mainland-ocean" transition zones on the example of O. Sakhalin. Environmental systems and devices, 2023, no. 6, pp. 74–83. (In Russian).

18. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т.18. Вып.4. Дальный Восток.Сахалин и Курилы / Под ред. М.Г. Васьковского. Л.: Гидрометеоиздат. 1973. 263 с.

Поступила в редакцию / Received 25.11.2025
Принята к публикации / Accepted 12.12.2025

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Рыбальченко Светлана Владимировна, кандидат географических наук, заведующий лабораторией, Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований Дальневосточного отделения РАН, г. Южно-Сахалинск, Россия, SPIN-код: 2432-0350, https://orcid.org/0000-0002-7849-9855, e-mail: rybalchenko_sv@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Svetlana V. Rybalchenko, Ph. D. (Geography), Head of the laboratory, Special Research Bureau for Automation of Marine Researches of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, SPIN-code: 2432-0350, https://orcid.org/0000-0002-7849-9855, e-mail: rybalchenko_sv@mail.ru.

Научная статья / Scientific paper
УДК: 550.46:504.06
DOI: 10.34753/HS.2025.7.3.259

Значение крупных и субмикронных коллоидов в миграции химических элементов и оценке качества речных вод Дальнего Востока России

В.М. Шулькин
Тихоокеанский Институт Географии ДВО РАН, г. Владивосток, Россия
e-mail: shulkin@tigdvo.ru

Аннотация. Обычно применяемые методики подготовки воды к химическому анализу не учитывают нахождения ряда химических элементов в составе коллоидных частиц, что обусловлено недостатком информации об их содержании в природных водах. В работе определено содержание крупных (0,05–0,45 мкм) и субмикронных (0,45–1,2 мкм) коллоидов методом динамического рассеяния света, в реках бореальной и арктической зон Дальнего Востока РФ, включая крупнейшие реки региона Амур и Колыму. Масс-спектрометрический анализ фильтратов, полученных после мембран с различным размером пор, позволил определить концентрацию химических элементов от Li до U во фракциях <0,45 и 0,45–1,2 мкм. Подтверждено, что макроионы (Na, K, Ca, Mg), а также Li, Sr, Ba, Mo, V, U, As, Mn мигрируют преимущественно в растворенных (<0,001мкм) и мелких коллоидных (0,001–0,007 мкм) формах. Однако для некоторых следовых элементов из этой группы (Li, Ba, U, V) обнаружено наличие субмикронных коллоидных форм в количестве 10–20 % от концентрации во фракции <0,45 мкм. Значимая корреляция между содержанием крупных коллоидов (0,05–0,45 мкм) и концентрацией элементов гидролизатов (Fe, Al, Ti, REEs, Zr, Ga, Th) в фильтратах <0,45 мкм указывает на частое доминирование крупных коллоидных форм в пуле растворенных и коллоидных форм этих металлов в речных водах Дальнего Востока РФ. Для этих же элементов гидролизатов обнаружены формы, связанные с субмикронными коллоидами, в концентрации равной или большей, чем в фильтратах <0,45мкм. Информация о содержании крупных и субмикронных коллоидов позволяет более корректно оценить соответствие вод нормативам качества по Al и Fe. Содержание крупных и субмикронных коллоидов в речных водах зависит от количества взвеси и от её гранулометрического состава, которые в свою очередь, определяются гидрологическим и водным режимами рек, а также особенностями ландшафтов и почвенного покрова на водосборах. Среди изученных рек, при сходных водных режимах, максимальное содержание крупных коллоидов было обнаружено в реках бассейна Уссури – правого притока р. Амур, дренирующих горно-таежные и заболоченные ландшафты. Пониженное содержание крупных коллоидов наблюдалось в реках Камчатка, Туманная и Колыма за счет относительно грубого гранулометрического состава взвеси с преобладанием алевритового материала.

Ключевые слова: речные воды; крупные и субмикронные коллоиды; динамическое рассеяние света; растворенные, коллоидные и взвешенные формы химических элементов; Дальний Восток России; река Амур; река Колыма; река Уссури.

Для цитирования: Шулькин В.М. Значение крупных и субмикронных коллоидов в миграции химических элементов и оценке качества речных вод Дальнего Востока России // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2025. Т. 7. Вып. 3. С. 259–273. DOI: 10.34753/HS.2025.7.3.259.

The Importance of Coarse Colloids in the Migration of Chemical Elements and the Assessment of the Quality of River Waters in the Russian Far East

Vladimir M. Shulkin
Pacific Geographical Institute Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia
e-mail: shulkin@tigdvo.ru

Abstract. The study characterized the content of coarse colloids, consisting of large (0.05–0.45 μm) and submicron (0.45–1.2 μm) fractions, determined by dynamic light scattering in the rivers of the boreal and arctic zones of the Russian Far East. Analysis of filtrates obtained after filtration through membranes with different pore sizes by the ICP-MS method allowed to determine the concentration of chemical element forms from Li to U in fractions <0.45

and <1.2 μm. It was confirmed that major cations, as well as Li, Sr, Ba, Mo, U migrate mainly in dissolved and small colloidal forms. At the same time, for a number of trace elements (Li, Ba, U, V), submicron migration forms have been detected, the concentration of which is controlled by the content of submicron colloids (0.45–1.2 μm). A significant correlation between the content of large colloids and the concentration of hydrolysates (Fe, Al, Ti, REEs, Zr, Hf, Th) in filtrates <0.45 μm indicates a frequent dominance of large colloidal forms in the migration of these metals in river waters of the Russian Far East. For the same hydrolysates, forms associated with submicron colloids were found in concentrations equal to or greater than in filtrates <0.45 μm. Direct information on the content of large and submicron colloids allows a more accurate assessment of water compliance with quality standards for hydrolysates, for Fe and Al, first of all. The content of large and submicron colloids in river waters depends on the amount of suspended matter and its grain size composition, which in turn are determined by the hydrological and water regimes of the rivers, as well as by the landscape features and underlying rocks of the catchment areas. Among the rivers studied with similar water regimes, the maximum content of coarse colloids was found in the Ussuri River basin, a right tributary of the Amur R., draining mountain-taiga landscapes, with high proportion of swampy areas. A diminished content of coarse colloids was observed in the Kamchatka, Tumannaya, and Kolyma rivers with enhanced proportion of silt particles in the suspended solids.

Keywords: river waters; coarse, large and submicron colloids; dynamic light scattering; dissolved, colloidal and suspended forms of chemical elements; Russian Far East; Amur River; Kolyma River; Ussuri River.

For citation: Shulkin V.M. The Importance of Coarse Colloids in the Migration of Chemical Elements and the Assessment of the Quality of River Waters in the Russian Far East. Hydrosphere. Hazard processes and phenomena, 2025, vol. 7, iss. 3, pp. 259–273. DOI: 10.34753/HS. 2025.7.3.259. (In Russian; abstract in English).

Введение

Роль и значение коллоидных частиц (0,001–1 мкм) в биогеохимических процессах в водных экосистемах сформулированы достаточно давно [1], однако оценка качества вод и большинство гидрохимических исследований до сих пор базируется на данных химического анализа фильтратов через мембраны с размером пор 0,45 мкм. При этом фракция 0,45–1,0 мкм по определению входит в состав взвешенных форм и отдельно не оценивается, хотя субмикронные частицы седиментационно устойчивы и способны к длительной миграции в водном потоке. Кроме того, при фильтрации возможна плохо контролируемая потеря части крупных коллоидных форм <0,45 мкм за счет кольматации мембранных фильтров. Цикл работ на реках севера Европейской части РФ, и Сибири с применением каскадной фильтрации, ультрафильтрации и диализа показали, что значительная часть Fe, Al, Ti, LREEs, других элементов-гидролизатов мигрируют в составе крупных (0,007–0,45 мкм) коллоидных частиц [2, 3, 4], вероятно с доминированием гидроксидов Fe [5]. С другой стороны, для HREEs, тяжелых металлов-халькофилов (Zn, Cu, Ni, Cd) и некоторых металлоидов более важны мелкие/средние коллоидные формы (0,001–0,007 мкм), а щелочные металлы, оксианионы и растворенный органический углерод (РОУ) мигрируют преимущественно в мелко-коллоидных и растворенных формах (<0,001–0,003 мкм) [6]. В ходе этих детальных работ количество крупных коллоидов в фильтратах прямо не оценивалось, хотя вероятно именно этот параметр может контролировать распределение химических элементов по коллоидным формам миграции. Кроме того, данные по содержанию крупных коллоидов позволяют охарактеризовать полноту сепарации растворенных и коллоидных форм при фильтрации, т.е. подойти к решению проблемы кольматации мембранных фильтров, которая существенно влияет на оценку качества вод по концентрации таких металлов как Fe, Al, Ti, REEs [7, 8]. Было показано, что содержание крупных (0,05–0,45 мкм) коллоидов в фильтратах <0,45 мкм речных вод бореальной зоны Дальнего Востока РФ весьма изменчиво и значимо коррелирует с концентрацией в фильтратах Fe, Al, Ti, а также РЗЭ, Th, Zr, Hf, Sc, Ge [9]. Однако, факторы, контролирующие сезонные и региональные вариации содержания крупных коллоидов в речных водах, не охарактеризованы. Особенно мало информации о содержании субмикронных коллоидов (0,45–1,0 мкм) в речных водах, хотя показано, что их роль в миграции некоторых химических элементов может быть велика [6, 10].

Цель данной работы – характеристика роли крупных (0,05–0,45 мкм) и субмикронных (0,45–1,2 мкм) коллоидов в балансе растворенных и коллоидных форм химических элементов от Li до U в речных водах Дальнего Востока РФ, а также выявление природных и антропогенных факторов, контролирующих концентрацию крупно-коллоидных и субмикронных форм химических элементов. Для этого сначала необходимо установить масштабы и причины изменчивости содержания крупных и субмикронных коллоидных частиц в речных водах, определенных методом динамического рассеяния света (ДРС). Вторая задача – оценка возможности использования данных по содержанию крупных и субмикронных коллоидов для характеристики изменения качества речных вод по элементам гидролизатам (Fe, Al, Ti и др.), в том числе за счет фильтрации проб воды при их химическом анализе.

Материалы и методы

Изучались воды, отобранные в 2023–2024 гг. в реках Дальнего Востока РФ различного размера, с водосборами, расположенными в различных природно-климатических условиях от южной бореальной до арктической зон, и покрытых разнообразными ландшафтами. В том числе изучались воды крупнейшего водотока региона – р. Амур, его притоков – рек Уссури, Б. Уссурка, Бикин, а также рек Туманная и Раздольная, расположенных на юге Приморья и дренирующих хозяйственно освоенные водосборы. Кроме того, рассмотрены р. Камчатка – крупнейшая река одноименного полуострова, и нижнее течение р. Колымы – единственной крупной реки Мира, с водосбором полностью расположенном в зоне постоянной мерзлоты. Поскольку предполагается, что количество крупных коллоидов зависит, прежде всего, от содержания взвеси, которое имеет высокую сезонную изменчивость, опробование на реках юга Дальнего Востока РФ проводилось при различных водных режимах от минимальной водности в ледостав, и до летних муссонных паводков. Реки Камчатка и Колыма изучались в период весеннего половодья и его спада. Пробы воды отбирали и транспортировали в лабораторию с соблюдением всех предосторожностей во избежание загрязнения. Схема района работ приведена на рисунке 1, общая характеристика гидрохимических проб, обсуждаемых в статье – в таблице 1.

Для анализа элементного состава методом ИСП-МС (Agilent 7500, ЦКП ДВГИ ДВО РАН) использовали подкисленные фильтраты первых 100 мл проб через 47 мм мембраны PVDF или 50 мл через 33 мм шприц-насадки PVDF Millipore с размером пор 0,45 мкм. Эти данные интерпретировали как концентрацию химических элементов во фракции <0,45 мкм. Кроме того, аликвоты проб фильтровали через капсульные фильтры GWV 0,45 мкм, не подверженные кольматации, для оценки пределов её влияния на содержание крупных коллоидов в фильтратах через мембраны. Для части проб (12 проб р. Колыма и 9 проб рек юга ДВ РФ, отобранных летом 2024 г.) ещё одну аликвоту 50 мл фильтровали через 33 мм шприц-насадку Minisart с размером пор 1,2 мкм для сбора и анализа фракции <1,2 мкм. Концентрацию химических элементов во фракции 0,45–1,2 мкм определяли по разности концентраций во фракциях <1,2 мкм и <0,45 мкм. Правильность элементного анализа контролировали анализом стандартного образца воды SRLS-6. Расхождение с паспортными данными не превышало 10–20 %. В фильтратах <0,45 мкм после капсульных фильтров определяли содержание растворенного органического углерода (РОУ) методом каталитического окисления и нитраты методом жидкостной хроматографии (Shimadzu TOC, и LC-10 ЦКП ТИГ ДВО РАН). Мембранные фильтры 47 мм после фильтрации 0,5–1 л речных вод сушили до постоянного веса для гравиметрического определения содержания взвеси. В пробах с содержанием взвеси более 50 мг/л определяли её гранулометрический состав методом лазерной дифракции на приборе Fritsch Analyzette Nano.

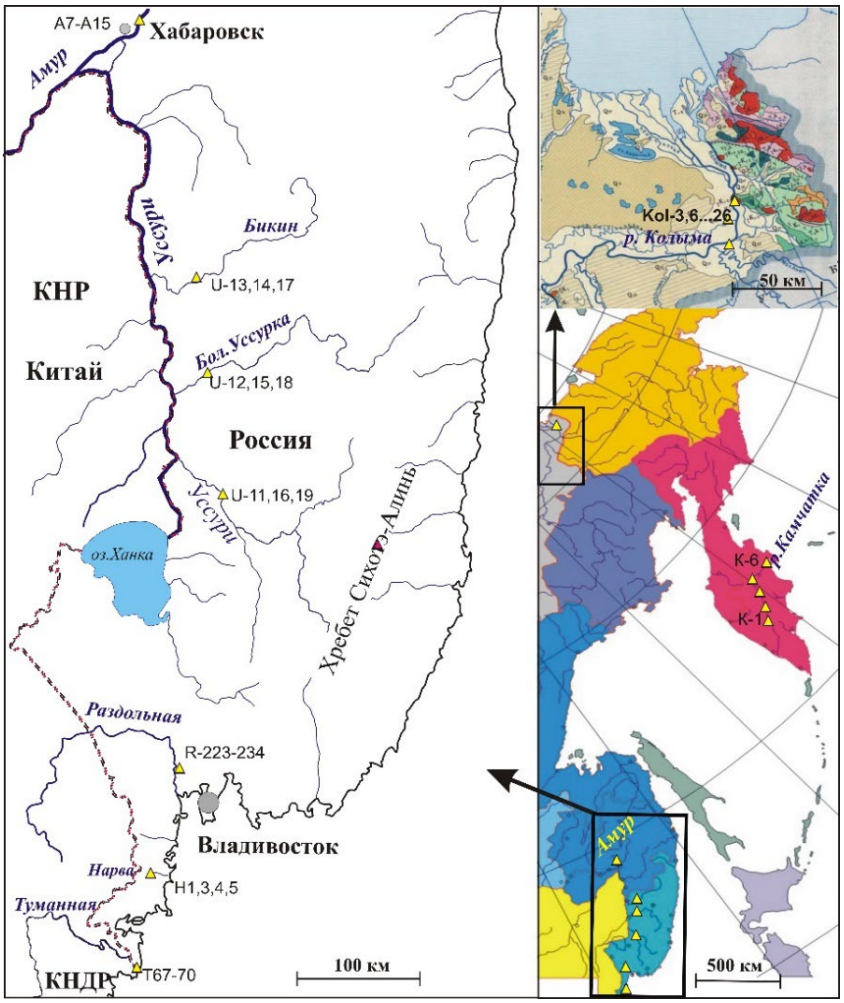


Рисунок 1. Схема района работ, треугольники – места отбора проб и номера проб
Figure 1. Study area, triangles – location of sampling point and number of samples

Таблица 1. Краткая характеристика изученных рек и отобранных проб
Table 1. Major characteristics of the rivers studied

Река	Водосбор, км^2	Ср. расход воды, м^3/с	n	Месяцы отбора	SS, мг/л	EC, uS/см	NO_3, мгN/л	POУ, мгC/л
Туманная	33168	287	4	IV, VIII, X	8,5–624	97–183	0,38–1,22	2,47–5,83
Нарва	332	4.2	4	IV, VIII, X	1,1–128	38–47	0,04–0,32	1,16–7,40
Раздольная	16800	72	11	I – XII	6,8–799	73–165	0,37–1,65	4,73–9,31
бас. Уссури*	77100	826	12	II, IV, VIII	1,3–31,7	37–56	0,11–0,68	3,62–10,32
Амур**	1630000	12800	9	II, VIII	4,6–121,2	57–144	0,14–0,93	5,42–8,47
Камчатка	55900	924	5	VI	10,9–166,6	46–73	0,19–0,25	2,93–3,18
Колыма	643000	3800	12	VI – VII	1,7–92	41–126	0,045***	3,6–12,54

n – число проб, * – реки Уссури, Б. Уссурка, Бикин, ** – створ г. Хабаровска, *** – по данным [11],
SS – содержание взвеси, EC – проводимость, NO_3 – нитратный азот, POУ – растворенный органический углерод

Во всех фильтратах определяли интенсивность (I) динамического рассеяния света (ДРС) (имп/с, counts per sec, cps) на приборе PHOTOCOR Compact Z (Россия). Использовалась мощность лазера 15 мВт, время накопления сигнала 3 мин, необходимый объем пробы 1–2 мл. Воспроизводимость данных по интенсивности ДРС повторных и параллельных проб составляла 90–97 %. Экспериментами с суспензиями частиц ПММА (полиметилметакрилата) размером

0,08–2,0 мкм было доказано, что интенсивность ДРС пропорциональна массовому содержанию частиц, и метод ДРС может быть использован для оценки содержания коллоидов размером 0,05–2,0 мкм в диапазоне концентраций 1–100 мг/л [12]. Это подтверждает более ранние исследования о достаточной чувствительности метода ДРС для определения частиц не мельче 0,05 мкм при концентрациях, наблюдаемых в речных водах [13]. Кроме того, результаты экспериментов и исследований [13] позволяют предположить аддитивность величин интенсивности ДРС и содержания крупных и субмикронных коллоидов. Соответственно, содержание субмикронных коллоидов 0,45–1,2 мкм оценивалось, исходя из разности интенсивности ДРС фильтратов <1,2 мкм и <0,45 мкм. Мембраны с размером пор 1,2 мкм использовались поскольку шприц насадки с размером 1,0 мкм от надежного производителя отсутствуют. Таким образом, в статье рассматривается концентрация химических элементов во фракции <0,45 мкм, а также во фракции 0,45–1,2 мкм, полученной вычитанием результатов анализа фильтратов <1,2 и <0,45 мкм.

Результаты и обсуждение

Изменчивость содержания крупных коллоидов (0,05–0,45 мкм) в фильтратах речных вод

Интенсивность ДРС фильтратов <0,45 мкм изученных речных вод колебалась от 5000 до 150000 имп/с. Если исходить из коэффициента пропорциональности 6×10^{-5}, установленного для частиц полиметилметакрилата (ПММА) [12], это соответствует массовому содержанию крупно-коллоидных частиц 0,3–9 мг/л. При этом из 57 проанализированных проб 88 % фильтратов через капсульные фильтры и 93 % фильтратов через мембраны имели интенсивность ДРС менее 50000 имп/с, т.е. характеризовались содержанием крупных коллоидов менее 3 мг/л. Можно констатировать, что при интенсивности ДРС менее 50000 имп/с результаты для фильтратов через мембранные и капсульные фильтры были достаточно близки (рисунок 2a). При большем содержании крупных коллоидов связь между интенсивностью ДРС в фильтратах через различные виды фильтров сохранялась только для рек бассейна р. Уссури, для которых характерно пониженное количество взвеси, и, соответственно, минимальное влияние кольматации. Для р. Раздольная с повышенным содержанием взвеси, интенсивность ДРС в фильтратах через капсульные фильтры была заметно выше, чем через мембраны при уровне интенсивности ДРС более 50000 имп/с, что свидетельствует о частичной кольматации мембран при фильтрации даже первых 100 мл. Это подтверждается максимальной разницей интенсивности ДРС между фильтратами через капсульные и мембранные фильтры для проб, отобранных в паводки при содержании взвеси более 200–300 мг/л и как следствие выраженной кольматации мембран (рисунок 2a).

Характер зависимости интенсивности ДРС фильтратов речных вод через мембраны 0,45 мкм, от исходного содержания взвеси варьирует как между реками, так и по сезонам (рисунок 2б). При увеличении содержания взвеси от 1,5–2 до 20–50 мг/л наблюдается рост интенсивности ДРС фильтратов, т.е. увеличение содержания крупных коллоидов. Масштабы этого роста различались между реками. Минимальный рост (от 5000 до 10000–20000 имп/с) независимо от типа фильтров, наблюдался для рек Камчатка, Туманная, Колыма. В реках Раздольная и Амур интенсивность ДРС повышались до 40000–60000 имп/с в фильтратах через мембраны (рисунок 2б) и до 120000–140000 имп/с в фильтратах через капсульные фильтры (рисунок 2c). В фильтратах через мембраны 0,45 мкм после максимума интенсивности ДРС при содержании взвеси 30–50 мг/л, дальнейший рост мутности сопровождался снижением количества крупных коллоидов (рисунок 2b). Наиболее явно это снижение было выражено для р. Раздольная, взвесь которой характеризуется преобладанием пелитовых частиц (<10 мкм), и для р. Амур, где доля пелитовых фракций также достаточно велика. Вероятная причина – кольматация мембран, поскольку в фильтратах через капсульные фильтры, не подверженных кольматации, уменьшения интенсивности ДРС при содержании взвеси 50–100 мг/л не наблюдалось (рисунок 2c).

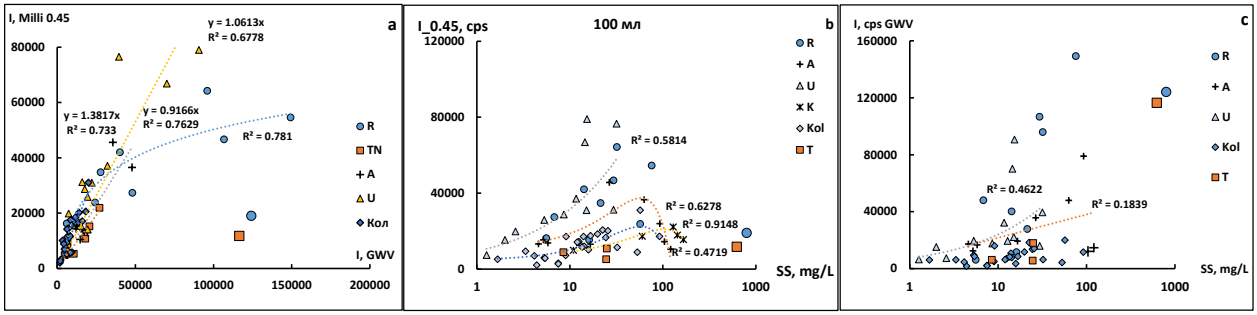


Рисунок 2. (а) Связь интенсивности ДРС (имп/с, cps) фильтратов, полученных после капсульных (I, GWV) и после мембранных (I, Milli 0.45) фильтров; (б) Зависимость интенсивности ДРС фильтратов первых 100 мл после мембранных фильтров от содержания взвеси в речных водах; (с) Зависимость интенсивности ДРС фильтратов после капсульных фильтров от содержания взвеси. Здесь и на рисунках 3–7: R – р. Раздольная, A – р. Амур, U – реки бассейна Уссури (Уссури, Б. Уссурка, Бикин), K – р. Камчатка, Kol – р. Колыма, T – р. Туманная. Более крупными значками обозначены пробы, отобранные во время паводков

Figure 2. (a) Relationship between DLS intensity (count per sec, cps) of the filtrates after capsules (I, GWV) and membranes (I, Milli 0.45); (b) Dependence of DLS intensity of the first 100 ml filtrates through membrane 0.45 from the suspended solids content; (c) The same for the filtrates after capsule filters 0.45 μm. Here and at the Figures 3-7: R – Razdolnaya, T – Tumen and Narva, A – Amur, U – Ussury, Big Ussurka, Bikin, K – Kamchatka, Kol – Kolyma. Large symbols mark flood samples

Таким образом, содержание крупных (0,05–0,45 мкм) коллоидов в речных водах зависит прежде всего от содержания взвеси (рисунок 2b), которое, в свою очередь, контролируется как водным режимом, так и физико-географическими условиями формирования стока отдельных рек, включая ландшафтную структуру водосборов. С точки зрения сезонной изменчивости явно выделяется только период ледостава зимой, когда содержание крупных коллоидов было значимо пониженным во всех реках. В остальные периоды года региональные различия между реками перекрывают сезонную изменчивость (рисунок 3a). С другой стороны, уровень содержания крупных коллоидов в различных реках отличался несмотря на высокую сезонную изменчивость: в реках бассейна Уссури и Раздольная он был значимо выше, чем в остальных (рисунок 3c). Доминирование региональных различий наиболее ярко видно на примере р. Камчатки для которой наблюдается низкий уровень содержания крупных коллоидов при высоком содержании взвеси, а также в реках бассейна Уссури, где повышенное содержание крупных коллоидов имеет место на фоне пониженного содержания взвеси (рисунок 3b, c).

Наиболее вероятной причиной региональных различий в уровне содержания крупных коллоидов отдельных рек являются особенности гранулометрического состава взвеси: по данным лазерной дифрактометрии на приборе Fritsch Analyzette Nano в период высокой воды для рек Туманная, Камчатка, Колыма, и отчасти Амур, характерна повышенная роль алевритового материала (0,1–0,01 мм), тогда как для рек Раздольная и особенно, Уссури доминирует пелитовая (<0,01 мм) взвесь.

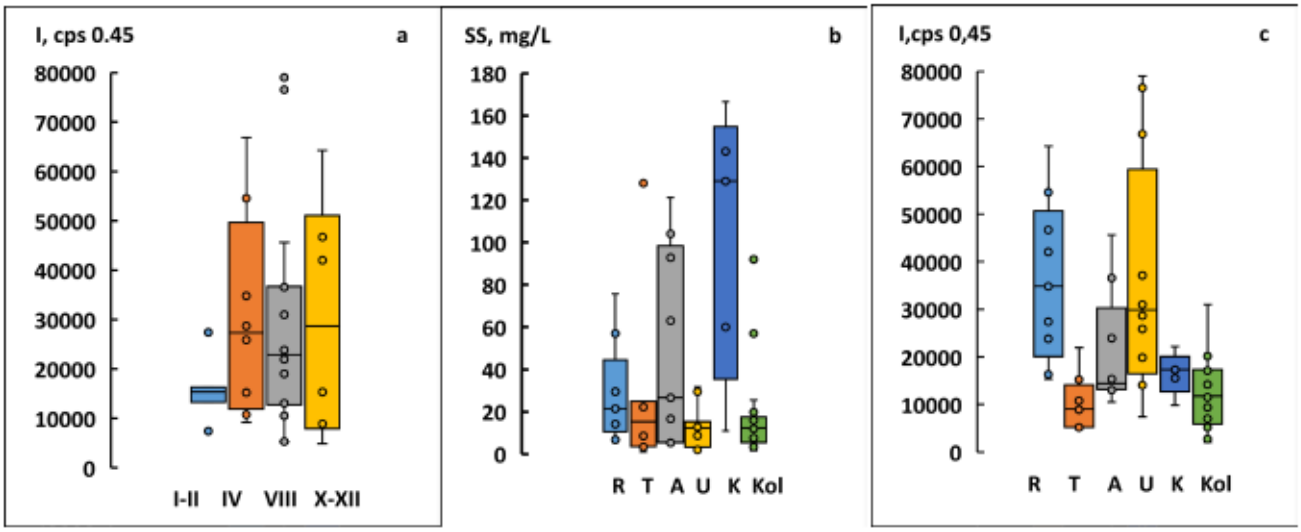


Рисунок 3. Вискер-диаграммы (а) сезонного изменения содержания крупных коллоидов в фильтратах <0,45 мкм; (б) регионального изменения содержания взвеси в отдельных реках; (с) изменения содержания крупных коллоидов в фильтратах <0,45 мкм отдельных рек бореальной и арктической зон Дальнего Востока РФ. Средние линии соответствуют медианам, верхние и нижние границы «ящиков» – 75 % и 25 % квартилям, точки – фактические данные; по оси абсцисс сезоны: I–II – январь-февраль, IV – апрель, VIII – август, X–XII – октябрь-декабрь; R – р. Раздольная, T – реки Туманная и Нарва, A – р. Амур, U – реки бассейна р. Уссури (Уссури, Б.Уссурка, Бикин), K – р. Камчатка, Kol – р. Колыма

Figure 3. Whisker-boxes of (a) seasonal changes of coarse colloids in the <0.45 um filtrates; (b) regional changes of the suspended solids content in the rivers; (c) regional changes of coarse colloids content in the <0.45 µm filtrates of the rivers from boreal and arctic zones of Russian Far East. Middle lines mark medians, upper and lower borders of boxes mark 25 and 75 quartiles, points – data, x-axis – seasons: I-II – January, IV – April etc., x-axis – rivers: R – Razdolnaya, T – Tumen and Narva, A – Amur, U – Ussury, Big Ussurka, Bikin, K – Kamchatka, Kol – Kolyma

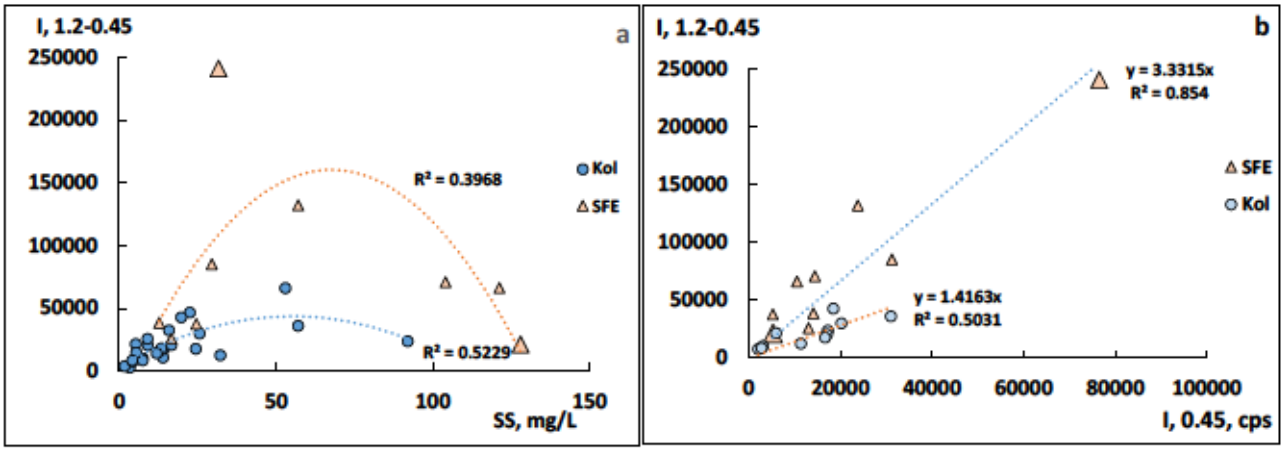


Рисунок 4. (а) Зависимость интенсивности ДРС субмикронных коллоидов (0,45-1,2 мкм) от содержания взвеси в водах р. Колымы (Kol) и рек юга Дальнего Востока РФ (SFE); (b) Связь интенсивности ДРС, отражающей содержание фракций (0,45-1,2 мкм), и (<0,45 мкм) в фильтратах р. Колымы (Kol) и рек юга Дальнего Востока РФ (SFE)

Figure 4. (a) Dependence of DLS intensity of submicron colloids (0.45-1.2 µm) on the suspended solids content (SS) in the Kolyma River (Kol) and boreal rivers of the Russian Far East (SFE); (b) Relationship of the DLS intensity of the coarse (<0.45µm) and submicron (0.45-1.2 µm) colloids in the Kolyma River (Kol) and boreal rivers of the Russian Far East (SFE)

Содержание субмикронных коллоидов (0,45–1,2 мкм) в речных водах

Судя по разности интенсивности ДРС в фильтратах <1,2 мкм и <0,45 мкм, содержание фракции 0,45–1,2 мкм соответствует интенсивности ДРС от 8000 до 66000 имп/с в водах низовьев р. Колымы, и от 21000 до 240000 имп/с в водах рек юга Дальнего Востока РФ. Если исходить из коэффициента пропорциональности 6×10^{-5}, установленного для частиц ПММА [12], это соответствует изменчивости содержания субмикронных частиц 0,5–4,0 мг/л в р. Колыме, и 1,2–15 мг/л. в реках юга ДВ РФ. Для субмикронных коллоидов, также как для крупных коллоидов, наблюдается нелинейная зависимость от содержания взвеси: рост взвеси до 50–60 мг/л сопровождается увеличением содержания субмикронных коллоидов в фильтратах, однако при большей мутности связь нарушается (рисунок 4a), вероятно в результате кольматации мембранных фильтров.

Несмотря на ограниченное число проб, можно отметить, что массовое содержание субмикронных (0,45–1,2 мкм) частиц в речных водах больше, чем крупно-коллоидных (0,05–0,45 мкм), хотя разброс данных достаточно велик (рисунок 4b). При этом соотношение между содержанием крупных и субмикронных коллоидов в изученных реках существенно различаются: в р. Колыма содержание субмикронных частиц, судя по интенсивности ДРС, больше, чем крупно-коллоидных в 1,4 раза, а для рек бореальной зоны Дальнего Востока РФ разница возрастает до 3,3 раз (рисунок 4b). Таким образом, содержание субмикронных коллоидов (0,45–1,2 мкм) в водах рек арктической зоны ДВ РФ заметно меньше, чем в бореальной зоне, что согласуется с меньшей интенсивностью химического выветривания на водосборах и более грубым гранулометрическим составом речной взвеси в климатических условиях Арктики.

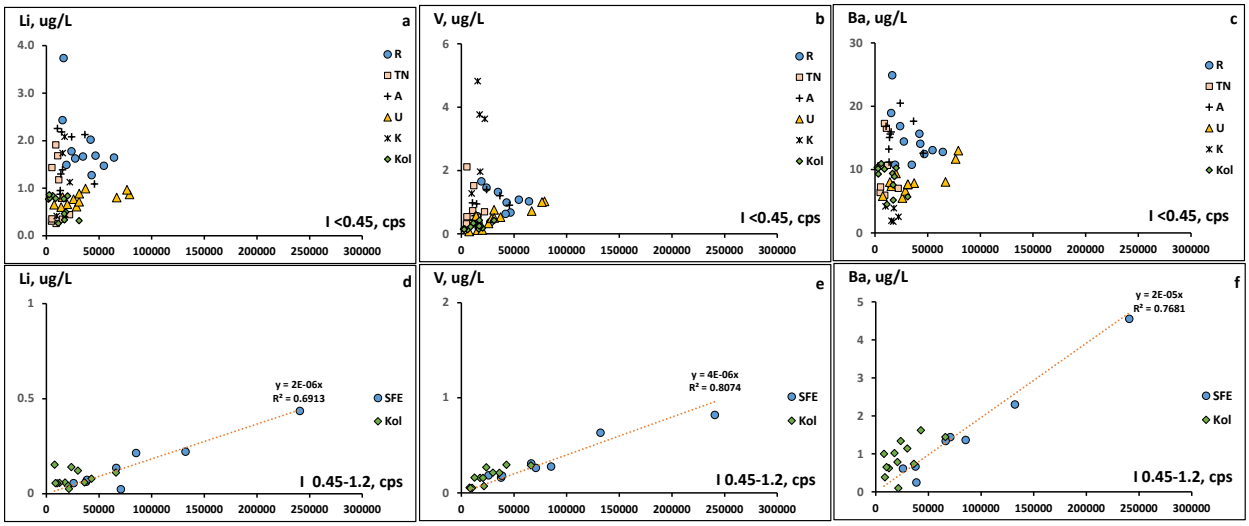


Рисунок 5. Зависимость концентрации Li (a), V (b), Ba (c) от содержания крупных коллоидов (0,05–0,45 мкм) в фильтратах <0.45 мкм , а также концентрации Li (d), V (e), Ba (f) во фракции 0,45–1,2 мкм от содержания субмикронных коллоидов (0,45–1,2 мкм)

Figure 5. Dependence of Li (a), V (b), Ba (c) concentration in the filtrates <0.45 μm on the content of coarse (0.05–0.45 μm) colloids, and dependence of Li (d), V (e), Ba (f) concentration in submicron colloidal fractions on the content of submicron colloids (0.45–1.2 μm)

Химический состав фильтратов речных вод с различным содержанием крупных и субмикронных коллоидов

В данной работе анализ роли коллоидных форм в миграции химических элементов в речных водах проводится на основании характера и силы связи их концентрации в фильтратах <0,45 и <1,2 мкм с содержанием в этих же фильтратах крупных и субмикронных коллоидных частиц, оцененном по интенсивности ДРС. Для фильтратов <0,45 мкм отсутствие корреляции между содержанием крупных коллоидов (0,05–0,45 мкм) и концентрацией химических элементов свидетельствует о доминировании для этих

элементов растворенных (<0,001 мкм) и/или мелкоколлоидных (0,001–0,007 мкм) форм. Во всех изученных реках наблюдается такое отсутствие связи с содержанием крупных коллоидов (0,05–0,45 мкм) для концентрации макрокатионов (Na, K, Ca, Mg), а также Li, Sr, Ba, Mo, U, V, As, Mn (рисунок 5a,b,c как пример для Li, V, Ba). Кроме того, для макроионов данные анализа фильтратов <0,45 и <1,2 мкм совпадают в пределах точности метода, т.е. субмикронные (0,45–1,2 мкм) коллоидные формы макроионов практически отсутствуют. Однако для таких следовых элементов как Li, V, Ba, U, As и для Mn наблюдается надежно определяемая концентрация субмикронных форм. Эта концентрация существенно (в 5–10 раз) меньше, чем в фильтратах <0,45 мкм, но обнаруживает значимую зависимость от содержания субмикронных коллоидов по данным ДРС (рисунок 5d, e, f как пример для Li, V, Ba), что позволяет судить об уровне концентрации субмикронных форм Li, V, Ba, U, As, Mn в изученных речных водах.

Для элементов гидролизатов, прежде всего для Fe, Ti, Al, в отличие от вышеперечисленных элементов с преобладанием растворенных форм, наблюдалась значимая корреляция между концентрацией в фильтратах <0,45 мкм и содержанием в них крупных коллоидов (рисунки 6a, b, c). Прямая зависимость концентрации Fe, Ti, Al от содержания крупных коллоидов указывает на доминирующую роль крупных коллоидных форм в балансе этих металлов в фильтратах <0,45 мкм. При этом для Al и Ti характер зависимости практически одинаков во всех реках несмотря на различия в размерах, водном режиме и разных природно-климатических условиях на водосборах (рисунки 6a, b). Для Fe при сохранении общей значимой зависимости, выделяются воды рек бассейна Уссури, а также части потока р. Амур, питаемого р. Уссури, где наблюдается повышенная концентрация Fe относительно содержания крупных коллоидов (рисунок 6c). Уровень концентрации субмикронных (0,45–1,2 мкм) форм Fe, Ti, Al близок к концентрации, определяемой в фильтратах <0,45 мкм. Имеет место значимая положительная корреляции субмикронных форм Fe, Ti, Al с содержанием субмикронных коллоидов по данным ДРС (рисунки 6d, e, f), что подтверждает обоснованность выделения субмикронных коллоидных форм этих металлов. Необходимо отметить закономерное различие параметров зависимости между концентрацией металлов и содержанием коллоидов для крупных и субмикронных коллоидных форм: для последних рост концентрации металлов в 2–3 меньше при сравнимом увеличении массового содержания коллоидов (рисунки 6a, b, c и 6d, e, f). Это указывает на относительное обогащение крупных (0,05–0,45 мкм) коллоидов металлами по сравнению с субмикронными (0,45–1,2 мкм) коллоидными частицами, что соответствует общей закономерности связи размера частиц с концентрацией в них металлов в случае доминирования сорбционных механизмов при формировании химического состава коллоидных частиц [1].

Необходимо отметить, что положительная корреляция между характеристиками не обязательно означает их причинно-следственную связь, а может отражать влияние общего внешнего фактора. Среди обсуждаемых рек подобная ситуация имеет место для р. Колымы, где серия проб была отобрана на пике и спаде весеннего половодья 2024 г. на фоне закономерного и значительного уменьшения расхода воды. Это сопровождалось снижением концентрации и крупных коллоидов, и концентрации элементов гидролизатов, и РОУ, приведшей к значимой корреляции между этими показателями [14]. В тоже время было неоднократно доказано, что РОУ мигрируют в реках преимущественно в растворенных и мелкоколлоидных (<0,007 мкм) формах [6, 15]. То есть, наблюдаемая корреляция между РОУ и содержанием крупных коллоидов на спаде половодья р. Колымы, обусловлена, вероятно, изменением водности. Однако все другие изученные реки были опробованы при различных водных режимах, весьма разнообразны по условиям на водосборах, и найти общий фактор, контролирующий вариации и содержания крупных или субмикронных коллоидов, и концентрацию элементов-гидролизатов не удается. Поэтому для этих рек близкий характер корреляционной связи между концентрацией Fe,

Ti, Al и содержанием крупных коллоидов может быть интерпретирован только как доминирование крупно-коллоидных (0,05–0,45 мкм) форм этих металлов в фильтратах <0,45 мкм речных вод ДВ РФ. Особенно это касается Al и Ti. Для Fe наблюдается повышение концентрации в реках бассейна Уссури, не связанное с увеличением содержания крупных коллоидов, что указывает на возможность дополнительного поступления здесь в речные воды Fe в виде мелких органоминеральных коллоидов или растворенных форм Fe^{2+} образующихся за счет восстановительных процессов на заболоченных ландшафтах или в донных отложениях.

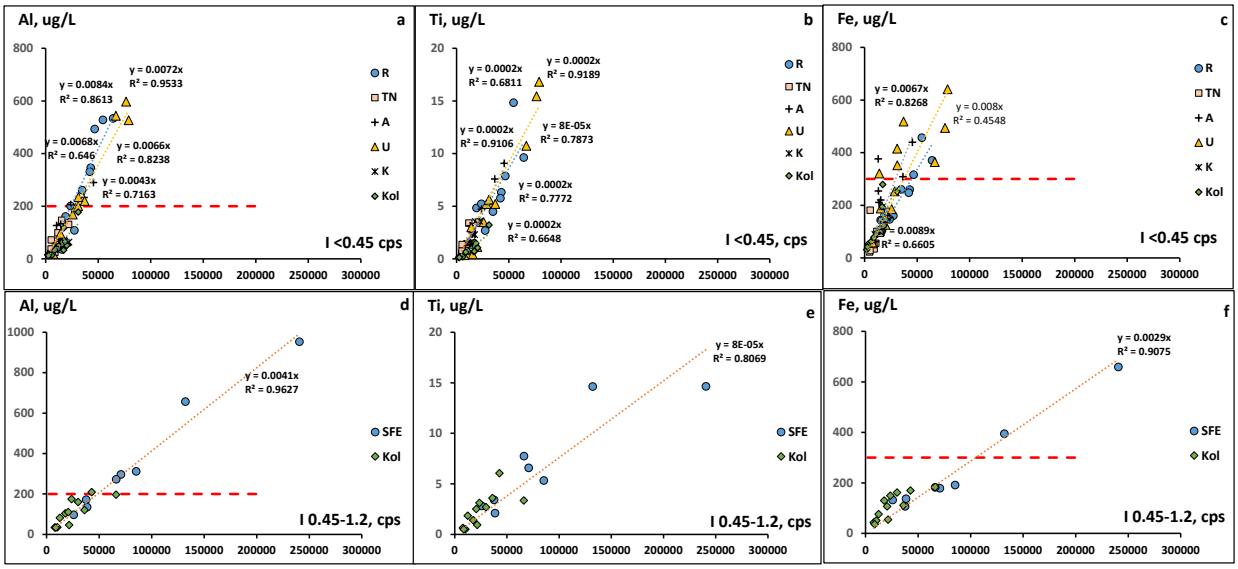


Рисунок 6. Зависимость концентрации Al (a), Ti (b), Fe (c) от содержания крупных коллоидов (0,05–0,45 мкм) в фильтратах <0.45 мкм , а также концентрации Al (d), Ti (e), Fe (f) во фракции 0,45–1,2 мкм от содержания субмикронных коллоидов (0,45–1,2 мкм). Пунктир на (a),(c),(d),(f) соответствует ПДК

Figure 6. Dependence of Fe (a), Ti (b), Al (c) concentration in the filtrates <0.45 μm on the content of coarse (0.05–0.45 μm) colloids, and dependence of Fe (d), Ti (e), Al (f) concentration in submicron colloidal fractions on the content of submicron colloids (0.45–1.2 μm). Dashed lines at (a), (c), (d), (f) are the WQS

Следовые элементы гидролизаты (Be, Ga, Sc, Y, Zr, REEs, Hf, Th) демонстрируют не столь сильную связь с содержанием крупных коллоидов в фильтратах <0,45 мкм, хотя значимость коэффициентов корреляции для всей выборки не вызывает сомнения, прежде всего за счет рек бассейна Уссури и р. Колыма (рисунки 7a, b, c как пример для Be, Ce, Th). Концентрация субмикронных форм этих следовых элементов гидролизатов составляет около 60–70 % от их концентрации в фильтратах <0,45 мкм (рисунок 7). Так же как для Fe, Al, Ti рост концентрации субмикронных форм следовых металлов гидролизатов при увеличении содержания субмикронных коллоидов (рисунки 7d, e, f) отстает от такового для крупных коллоидов в фильтратах <0,45 мкм (рисунки 7a, b, c).

Кроме вышеперечисленных двух основных групп химических элементов: 1) с очевидным преобладанием растворенных и мелких коллоидных форм в фильтратах <0,45 мкм – щелочные и щелочно-земельные макрокатионы, а также Li, Sr, Ba, Mo, U, V, As, Mn, и 2) элементов гидролизатов с доминированием (Fe, Al, Ti) или явным присутствием (Be, Ga, Sc, Y, Zr, REEs, Hf, Th) крупно коллоидных форм в фильтратах <0,45 мкм, выделяется 3ья группа химических элементов «тяжелых металлов» (Cu, Ni, Zn, Co, Cd) связь которых с крупными коллоидами проявлена лишь в р. Колыме и в реках бассейна Уссури (рисунки 8a, b, c). Кроме того, субмикронные формы этих элементов не превышают 20 % от концентрации в фильтратах <0,45 мкм, и не демонстрируют активного увеличения при повышении содержания субмикронных коллоидов в воде (рисунки 8d, e. f).

Таким образом, судя по уровню значимости корреляции между содержанием крупных коллоидов (0,05–0,45 мкм) и концентрацией химических элементов в фильтратах <0,45 мкм,

можно говорить о доминировании крупных коллоидных форм для Al, Ti во всех реках, и для Fe – в большинстве рек. Лишь в реках бассейна Уссури наблюдается повышение концентрации Fe в фильтратах <0,45 мкм непропорциональное увеличению содержания крупных коллоидов, что указывает на дополнительный вклад мелких коллоидных и/или растворенных форм Fe.

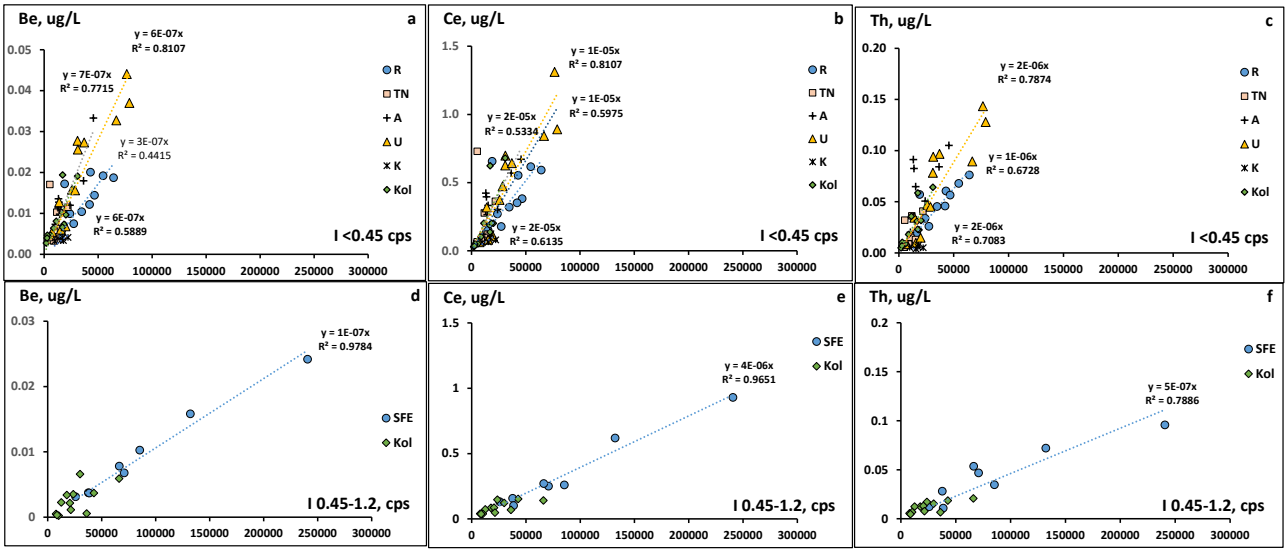


Рисунок 7. Зависимость концентрации Be (a), Ce (b), Th (c) от содержания крупных коллоидов (0,05–0,45 мкм) в фильтратах <0,45 мкм, а также концентрации Be (d), Ce (e), Th (f) во фракции 0,45–1,2 мкм от содержания субмикронных коллоидов (0,45–1,2 мкм)

Figure 7. Dependence of Be (a), Ce (b), Th (c) concentration in the filtrates <0.45 μm on the content of coarse (0.05–0.45 μm) colloids, and dependence of Be (d), Ce (e), Th (f) concentration in submicron colloidal fractions on the content of submicron colloids (0.45–1.2 μm)

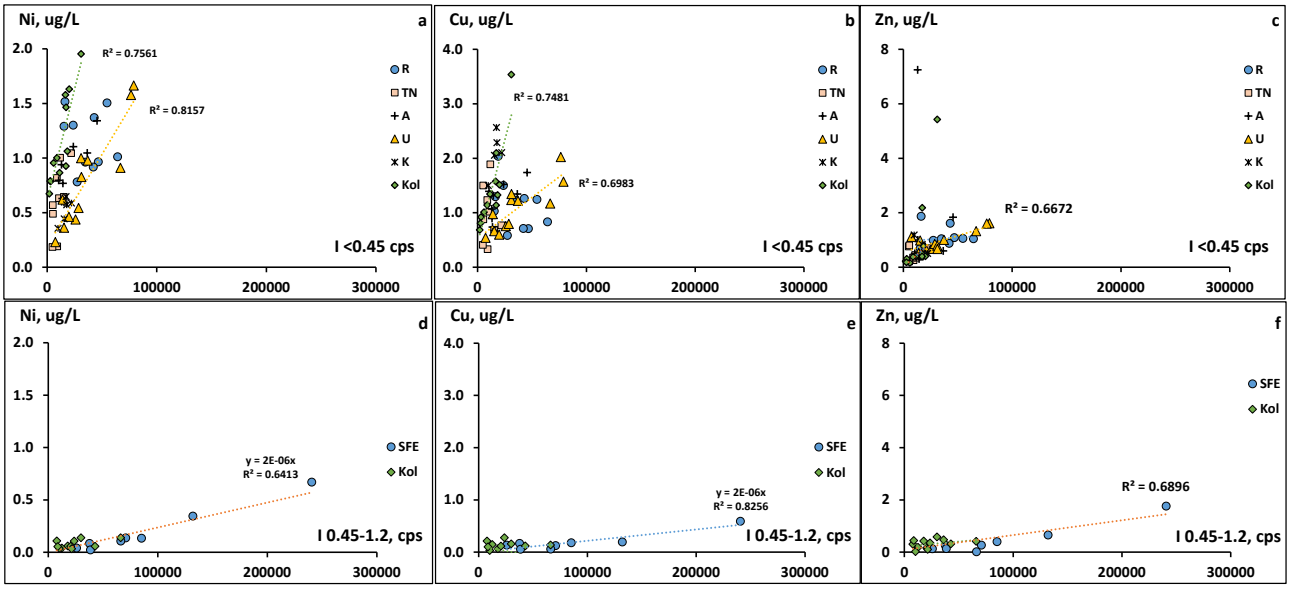


Рисунок 8. Зависимость концентрации Ni (a), Cu (b), Zn (c) от содержания крупных коллоидов (0,05–0,45 мкм) в фильтратах <0,45 мкм , а также концентрации Ni (d), Cu (e), Zn (f) во фракции 0,45–1,2 мкм от содержания субмикронных коллоидов (0,45–1,2 мкм)

Figure 8. Dependence of Ni (a), Cu (b), Zn (c) concentration in the filtrates <0.45 μm on the content of coarse (0.05–0.45 μm) colloids, and dependence of Ni (d), Cu (e), Zn (f) concentration in submicron colloidal fractions on the content of submicron colloids (0.45–1.2 μm)

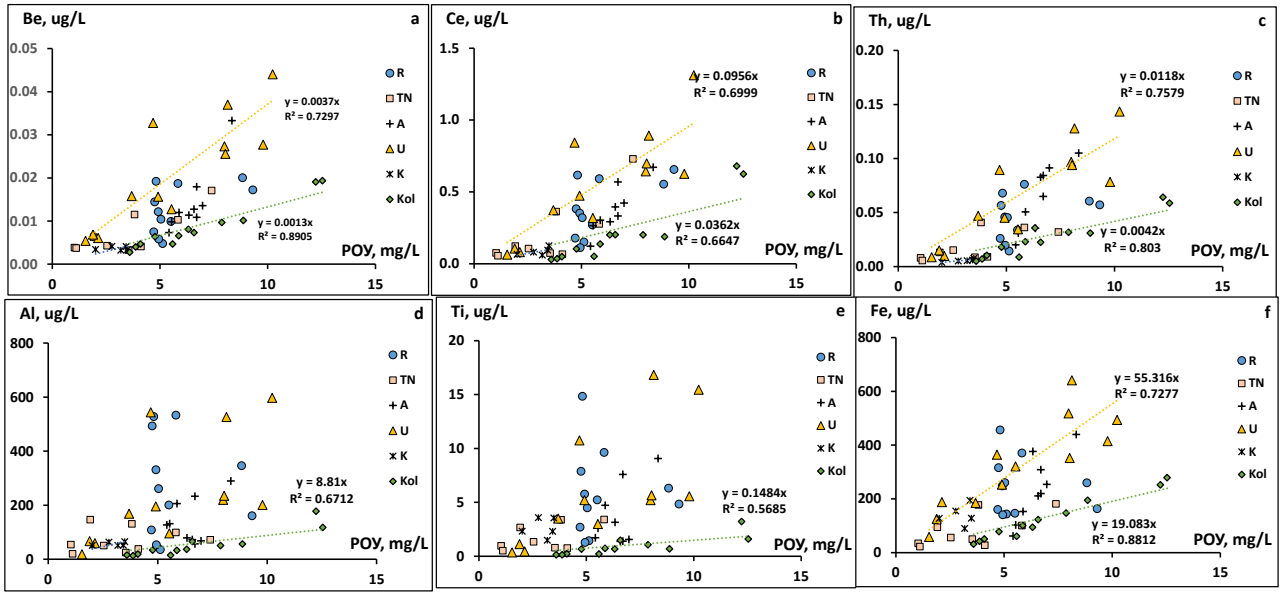


Рисунок 9. Зависимость концентрации Be (a), Ce (b), Th (c), Al (d), Ti(e), Fe(f) от содержания РОУ в фильтратах <0,45 мкм

Figure 9. Dependence of Be (a), Ce (b), Th (c), Al (d), Ti(e), Fe(f) concentration on the content of DOC in the filtrates <0,45 μm

Для следовых элементов гидролизатов (Be, Ga, Sc, Y, Zr, REEs, Hf, Th) в речных водах кроме крупных коллоидных форм, важную роль играют органоминеральные мелкие коллоиды, что было доказано детальными работами с применением ультрафильтрации и диализа [3, 15]. Это подтверждается значимой корреляцией между концентрацией РОУ и этих элементов в фильтратах, полученных при последовательной фильтрации через мембраны с постепенно уменьшающимся размером пор [6]. В данной работе значимая корреляция между концентрацией следовых элементов гидролизатов и РОУ наблюдается в фильтратах <0,45 мкм рек бассейна Уссури и р. Колымы (рисунки 9a, b, c как пример для Be, Ce, Th). Как уже отмечалось, для р. Колымы такая положительная корреляция обусловлена, вероятно, совпадающей реакцией и РОУ, и концентрации большинства элементов гидролизатов на значительное и закономерное снижение расхода воды при спаде весеннего половодья. Для рек бассейна Уссури, отобранных в различные водные режимы, зависимость концентрации следовых элементов гидролизатов от содержания РОУ свидетельствует о миграции заметной части этих элементов в составе органоминеральных мелких коллоидов. Для Fe в реках бассейна Уссури также наблюдается значимая корреляция с РОУ (рисунок 9f), как и для следовых элементов гидролизатов (рисунки 9a, b, c). Это указывает на то, что в реках бассейна р. Уссури определенная часть Fe, как и следовых элементов гидролизатов во фракции <0,45 мкм существует в виде органоминеральных мелких коллоидов. В тоже время значительная часть этих элементов в р. Уссури находится в составе крупных коллоидов 0,05–0,45 мкм, о чем свидетельствует значимая корреляция Fe и следовых элементов гидролизатов в фильтратах <0,45 мкм с содержанием в них крупных коллоидов 0,05–0,45 мкм (рисунки 6c, 7a, b, c). Интересно, что Al и Ti с выраженным доминированием крупных (0,05–0,45 мкм) коллоидов в изученных речных водах демонстрируют корреляцию с РОУ только в р. Колыма за счет одинаковой реакции на спад половодья. Во всех остальных реках концентрация Al и Ti не связана с РОУ (рисунки 9d, e).

Формы химических элементов, связанные с субмикронными (0,45–1,2 мкм) коллоидами, наиболее характерны для Al, Ti, Fe, содержащих субмикронные формы в концентрации близкой или превышающей сумму всех форм <0,45 мкм. Для следовых элементов гидролизатов (Be, Ga, Sc, Y, Zr, REEs, Hf, Th) содержание субмикронных форм составляет около 60–70 % от

концентрации всех форм <0,45 мкм. Для «тяжелых металлов» (Cu, Ni, Co, Cd, Zn) вклад субмикронных форм продолжает снижаться до 20 % от форм <0,45 мкм, а для следовых элементов, мигрирующих преимущественно в растворе (Li, Sr, Ba, Mo, U, V, As, Mn), вклад субмикронных форм не превышает 10 % от форм <0,45 мкм (рисунки 5–8). Для щелочных и щелочноземельных макрокатионов (Na, K, Ca, Mg) субмикронные коллоидные формы не характерны. Таким образом, несмотря на разнообразие опробованных рек и водных режимов, очевидно, что по возрастанию роли субмикронных коллоидных форм в сравнении с концентрацией всех форм <0,45 мкм, химические элементы образуют достаточно логичный и устойчивый ряд (Li, Sr, Ba, Mo, U, V, As) < (Cu, Ni, Co, Cd, Mn) < (Be, Ga, Sc, Y, Zr, REEs, Hf, Th) < (Fe, Ti, Al). Близкие по составу группы химических элементов выделялись при изучении растворенных, мелко-коллоидных и коллоидных форм миграции методами каскадной и центрифужной ультрафильтрации в реках бассейна Оби и европейского сектора Арктики [4, 15].

Влияние крупных и субмикронных коллоидов на оценку качества вод

Очевидно, что крупные и субмикронные коллоиды могут влиять на оценку качества речных вод только по химическим элементам, для которых наблюдается доминирование крупно-коллоидных форм, т.е. по элементам гидролизатам (Al, Fe, Ti, REEs и др.) во всех изученных реках (рисунки 6, 7), и по тяжелым металлам (Ni, Cu, Zn, Cd) в отдельных реках (реки бассейна Уссури) с повышенной концентрацией органоминеральных коллоидов (рисунок 8a, b, c). Соответственно, повышенное содержание крупных коллоидов (0,05–0,45 мкм) в фильтратах речных вод с высокой долей вероятности означает повышенную концентрацию этих элементов, часто превышающую ПДК для Fe и Al (рисунки 6a, c). Кроме того, информация о содержании крупных коллоидов в фильтратах и его изменении в зависимости от условий фильтрации дает возможность контролировать кольматацию фильтров, обычно используемых в пробоподготовке в РФ, ЕС, США. При кольматации происходит задержка части крупных коллоидов и соответствующее занижение концентрации химических элементов в фильтрате <0,45 мкм [7, 8]. Наиболее очевидно влияние кольматации для Fe и Al. Информация о содержании крупных коллоидов 0,05–0,45 мкм в фильтратах <0,45 мкм дает возможность оценить наличие и величину этого занижения. Для Ti, REEs и других следовых элементов гидролизатов, для которых ПДК пока не установлены, эти эффекты могут оказаться потенциально значимыми, поскольку нельзя исключить нормирование качества вод по этим элементам в будущем.

Для стран, использующих нормирование по концентрации металлов в нефильтрованных пробах (Китай, Корея, Япония) может оказаться полезной информация по содержанию субмикронных коллоидов (0,45–1,2 мкм) и концентрации субмикронных форм металлов, которые для Al и Fe могут быть сравнимы или превосходить ПДК даже для нефильтрованных проб (рисунки 6d, f).

Выводы

Метод динамического рассеяния света (ДРС) позволяет по интенсивности рассеяния определять содержание крупных (0,05–0,45 мкм) и субмикронных (0,45–1,2 мкм) коллоидов в фильтратах речных вод, а также дает возможность контролировать эффективность фильтрации и кольматацию фильтров. Кроме того, интенсивность ДРС нефильтрованных вод может быть использована для оценки общего содержания взвеси в интервале 1–50 мг/л.

Содержание крупных коллоидов в речных водах зависит от концентрации и гранулометрического состава взвеси, которые в свою очередь контролируются водным режимом рек в период опробования, ландшафтной структурой водосборов, и составом почвенного покрова и материнских пород.

В реках ДВ РФ крупные коллоидные формы доминируют для Al, Fe, Ti, играют существенную роль для следовых элементов-гидролизатов (Be, Ga, Sc, Y, Zr, REEs, Hf, Th), подчиненную для тяжелых металлов (Ni, Zn, Cu, Cd, Co) и мало

значимы для Li, Sr, Ba, Mo, U, V, As, Mn и макрокатионов.

Субмикронные коллоидные формы также наиболее типичны для элементов-гидролизатов, для которых их содержание сравнимо с концентрацией фракций <0,45 мкм, но не превышают 20 % от фракций <0,45 мкм для тяжелых металлов, 10–15 % от фракций <0,45 мкм для Li, Sr, Ba, Mo, U, V, As, Mn, и не характерны для макро катионов.

Влияние крупных коллоидов на оценку качества речных вод связано с доминированием крупно-коллоидных форм, прежде всего для Al и Fe. Соответственно, повышенное содержание крупных коллоидов сопровождается повышенной концентрацией этих элементов, часто превышающую ПДК в речных водах. Кроме того, информация о содержании крупных коллоидов в фильтратах речных вод позволяет оценивать влияние кольматации весьма вероятной при фильтрации проб в ходе их анализа.

Благодарности

Работа выполнена в рамках темы FWSW-2022-0015 Государственного задания ТИГ ДВО РАН при частичной поддержки полевых работ грантом РНФ 23-27-00029. Химико-аналитические работы проведены на базе ЦКП ЦЛЭДГИС ТИГ ДВО РАН и ЦКП ДВГИ ДВО РАН. Автор искренне благодарит всех сотрудников лаборатории геохимии ТИГ ДВО РАН принимавших участие в обработке проб.

Acknowledgements

The study was carried out within the framework of the state assignment of the Pacific Institute of Geography, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (PGI FEB RAS), theme FWSW-2022-0015, with partial support for fieldwork from the Russian Science Foundation grant No. 23-27-00029. Chemical and analytical analyses were performed at the Collective Use Center of the PGI FEB RAS and at the Collective Use Center of the Far Eastern Geological Institute, FEB RAS. The author sincerely thanks all staff members of the Geochemistry Laboratory at the PGI FEB RAS who participated in sample processing.

Литература / References

1. Buffle, J., K. J. Wilkinson, S. Stoll, M. Filella and J. Zhang. A generalized description of aquatic colloidal interactions: the three-colloidal component approach. Environ. Sci. Technol., 1998, vol. 32, pp. 2887–2899.
2. Алехин Ю.В. Ильина С.М., Лапицкий С.А., Ситникова М.В. Результаты изучения совместной миграции микроэлементов и органического вещества в речном стоке бореальной зоны // Вестн. Моск. Ун-та. Сер. 4. Геология. 2010. № 6. С. 49–55.
3. Pokrovsky O.S., Viers J., Shirokova L.S., Shevchenko V.P., Filipov A.S., Dupre B. Dissolved, suspended, and col loidal fluxes of organic carbon, major and trace elements in the Severnaya Dvina River and its tributary. Chem. Geol., 2010, vol. 273, pp. 136–149.
4. Pokrovsky O.S., Manasypov R.M., Loiko S.V., Shirokova L.S. Organic and organo-mineral colloids in discontinuous permafrost zone.Geochim. Cosmochim. Acta., 2016, vol. 188, pp. 1–20.
5. Hirst C., Andersson P.S., Shaw S., Burke I.T., Kutscher L., Murphy M.J., Maximov T., Pokrovsky O.S., Morth M., Porcelli D. Characterization of Fe-bearing particles and colloids in the Lena River basin, NE Russia.Geochim. Cosmochim. Acta, 2017, vol.213, pp. 553–573.
6. Pokrovsky O.S., Schott J. Iron colloids/organic matter associated transport of major and trace elements in small boreal rivers and their estuaries (NW Russia). Chem. Geol., 2002, vol. 190, pp. 141–179.
7. Horowitz A.J. A Review of Selected Inorganic Surface Water Quality-Monitoring Practices: Are We Really Measuring What We Think, and If So, Are We Doing It Right? Environ. Sci. Technol., 2013, vol. 47, pp. 2471−2486.

8. Шулькин В.М., Богданова Н.Н., Еловский Е.В. Влияние кольматирования фильтров на определение концентрации истинно-растворенных и коллоидных форм миграции химических элементов в речных водах // Вод. ресурсы. 2022. Т. 49. № 1. С. 91 102. DOI: 10.31857/S0321059622010163.
Shulkin V.M., Bogdanova N.N., Elovsky E.V. Effect of filter clogging on the determination of concentration of chemical elements migrating in river water as components of true solutions or in colloidal forms. Water Resources, 2022, vol. 49, no.1, pp.122–133.

9. Шулькин В. М., Еловский Е. В. Оценка содержания крупных коллоидов методом динамического рассеивания света при химическом анализе речных вод Дальнего Востока РФ // Водные ресурсы, 2025. Том 52. № 4. С. 78–93.
Shulkin V. M., Elovsky E. V. Evaluation of the Content of Large Colloids by the Method of Dynamic Light Scattering in Chemical Analysis of River Waters of the Far East of the Russian Federation. Water Resources, 2025, vol. 52, no. 4, pp. 750–762

10. Vignati D., Dominik J. The role of coarse colloids as a carrier phase for trace metals in riverine systems. Aquat. Sci., 2003, vol.65, pp. 129–142. DOI: 10.1007/s00027-003-0640-2.

11. Holmes R.M., McClelland J.W., Bruce J. Peterson B.J., Tank S.E., Bulygina E., Timothy I. Eglinton T.I., Gordeev V.V., Gurtovaya A.Y., Raymond P. A., Repeta D.J., Staples R., Robert G. Striegl R.G., Zhulidov A. V., Zimov S.A. Seasonal and Annual Fluxes of Nutrients and Organic Matter from Large Rivers to the Arctic Ocean and Surrounding Seas. Estuaries and Coasts. 2012. V 35. P. 369–382. DOI:10.1007/s12237-011-9386-6.

12. Шулькин В. М. Применение метода динамического рассеяния света для оценки содержания крупно-коллоидных и взвешенных частиц в речных водах // Доклады академии наук. Науки о земле. 2025. Том 521. № 4. С. 67–73.
Shulkin V.M. Application of dynamic light scattering for assessing the content of large colloidal and suspended particles in river waters. Doklady Earth Sciences, 2025, vol. 521, no. 1, pp. 1–6.

13. Filella M., Zhang J., Newman M.E., Buffle J. Analytical applications of photon correlation spectroscopy for size distribution measurements of natural colloidal suspensions: capabilities and limitations // Colloids Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects, 1997, vol. 120, pp. 27–46.

14. Shulkin, V., Davydov, S., Davydova, A., Lutsenko, T., Elovskiy, E. Scale and Reasons for Changes in Chemical Composition of Waters During the Spring Freshet on Kolyma River, Arctic Siberia. Water, 2025, vol. 17, 2400. DOI:10.3390/w17162400.

15. Ilina, S.M., Lapitskiy, S.A., Alekhin, Y.V., Viers, J., Benedetti, M., Pokrovsky, O.S. Speciation, Size Fractionation and Transport of Trace Elements in the Continuum Soil Water–Mire–Humic Lake–River–Large Oligotrophic Lake of a Subarctic Watershed. Aquat. Geochem., 2016, vol. 22., pp. 65–95.

Поступила в редакцию / Received 15.11.2025
Принята к публикации / Accepted 04.12.2025

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Шулькин Владимир Маркович, доктор географических наук, главный научный сотрудник, Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, г. Владивосток, Россия, SPIN-код: 7364-0320, https://orcid.org/0000-0003-4610-2582, e-mail: shulkin@tigdvo.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Vladimir M. Shulkin, D.Sc. (Geography), Chief Researcher, Pacific Geographical Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia, SPIN-code: 7364-0320, https://orcid.org/0000-0003-4610-2582, e-mail: shulkin@tigdvo.ru.

Научная статья / Scientific paper
УДК: 556.5:58.009:58.03:571.1
DOI: 10.34753/HS.2025.7.3.274

Продление гидрологических рядов дендрохронологическими реконструкциями на примере тополя черного и ивы белой в Западной Сибири

М.А. Гурская [1], Л.И. Агафонов [1], М.О. Ермоленко [2]
[1] *Институт экологии растений и животных УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия*
[2] *Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, Россия*
e-mail: mgurskaya@yandex.ru

Аннотация. Продление гидроклиматических рядов в прошлое является актуальной задачей современной гидрологии и климатологии. Косвенным источником информации о гидрологических параметрах могут служить годичные кольца деревьев, произрастающих в поймах рек. В северных и аридных экосистемах реконструкции расходов воды по ширине годичного кольца успешны, тогда как в условиях с умеренным климатом подобных исследований не проводилось. Кроме того, в существующих работах до сих пор нет однозначного ответа, какой параметр лучше использовать для реконструкции – уровни или расходы воды. Цель этой работы − изучить связи между средними месячными уровнями и расходами воды реки Тура (гидропост Туринск) и шириной годичных колец тополя черного и ивы белой, выполнить реконструкции и выявить годы с экстремальными значениями. Ширина годичных колец измерена на буровых образцах (кернах), полученные серии лет были перекрестно сдатированы, и индексированные обобщенные хронологии построены за период 1876–2022 гг. по тополю и 1879–2022 гг. по иве. Корреляционный анализ выявил в хронологии по тополю более тесные связи с уровнями воды в мае, чем с расходами, а в хронологии по иве – с уровнями апреля-мая. Регрессионный анализ позволил выполнить реконструкции высоких и низких уровней и расходов воды для реки Тура. Модель реконструкции уровней воды существенно не отличалась от модели расходов. Тем не менее, годы экстремальных значений стока лучше реконструируются с помощью модели уровня воды, чем с помощью модели расходов, что обусловлено с широкой поймой реки и нелинейными связями уровни–расходы при экстремальных уровнях воды. Выявлены периоды с высоким и низким уровнем воды. Прибрежные деревья тополя черного и ивы белой, произрастающие вдоль русел рек, являются хорошими индикаторами гидрологических изменений в южной тайге в Западной Сибири.

Ключевые слова: уровни и расходы воды; тополь черный; ива белая; ширина годичных колец; древесно-кольцевые хронологии; дендрохронологические реконструкции; экстремальные годы; южная тайга; Западная Сибирь.

Для цитирования: Гурская М.А., Агафонов Л.И., Ермоленко М.О. Продление гидрологических рядов дендрохронологическими реконструкциями на примере тополя черного и ивы белой в Западной Сибири // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2025. Т. 7. Вып. 3. С. 274–285. DOI: 10.34753/HS.2025.7.3.274.

Prolongation of Hydrological Rows of Water Levels and Discharge Using Dendrochronological Reconstructions on Example of Black Poplar and White Willow in Western Siberia

Marina A. Gurskaya [1], Leonid I. Agafonov [1], Maxim O. Yermolenko [2]
[1] *Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia;* [2] *Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia*
e-mail: mgurskaya@yandex.ru

Abstract. Extending hydroclimatic time series is a critical task in hydrology and climatology. Tree rings from riparian forests offer a valuable proxy for reconstructing hydrological parameters. While tree-ring-based streamflow reconstructions are established in northern and arid ecosystems, such studies are absent for temperate climates. A consensus is also lacking on whether water level or water discharge is more suitable for reconstruction. This study analyses relationships between mean monthly water levels and discharge of the Tura River (Turinsk gauge) and ring

widths of *Populus nigra* L. (poplar) and *Salix alba* L. (willow), to reconstruct these variables and identify extreme hydrological years. Ring-width measurements were obtained from tree cores. Cross-dated individual series were used to build standardized residual chronologies for poplar (1876–2022) and willow (1879–2022). Correlation analysis has shown a stronger relationship between the poplar chronology and May water levels, and willow chronologies and April-May water levels, than with corresponding discharge data. Linear regression was used to reconstruct both hydrological variables. Despite higher correlation coefficients with water levels, the reconstruction models for level and discharge were similar. However, the water level model better captured extreme hydrological years. These strong associations during extreme years are attributed to the wide floodplain of the Tura River. Periods of high and low streamflow were successfully identified. The results confirm that poplar and willow from the river floodplain are reliable proxies for hydrological changes in the southern taiga of Western Siberia.

Keywords: water levels and water discharge; black poplar; white willow; tree-ring width; tree-ring chronologies; reconstructions; extreme years; southern taiga; Western Siberia.

For citation: Gurskaya M. A., Agafonov L. I., Yermolenko M. O. Prolongation of hydrological rows of water levels and discharge using dendrochronological reconstructions on example of black poplar and white willow in Western Siberia. Hydrosphere. Hazard processes and phenomena, 2025, vol. 7, iss. 3, pp. 274–285. DOI: 10.34753/HS. 2025.7.3.274. (In Russian; abstract in English).

Введение

Большинство массовых, систематических и стандартизированных инструментальных измерений гидроклиматических параметров в России систематически ведутся с середины 1930-х годов XX века [1]. Столетние ряды наблюдений редки, и часто они связаны с неоднородностями, обусловленными изменениями в инструментальных средствах, окружающей среде и практике наблюдений [2, 3]. Поэтому поиск косвенных источников данных о гидроклиматических событиях в прошлом очень важен.

Дендрохронологический анализ часто используется для реконструкции различных гидроклиматических событий. Годичные кольца деревьев, произрастающих в поймах рек содержат информацию об их гидрологическом режиме [4–7]. В дендрохронологических реконструкциях наиболее часто используются количественные оценки гидрологического режима, а именно расходы воды в $м^3/с$ [4–13]. Эти измерения имеют объективную оценку количества воды, проходящей через живое сечение реки в единицу времени.

Расход воды является одной из ключевых характеристик потока, определяющих другие его параметры, включая уровень. Зависимость $Q = Q(H)$ для определенного участка водотока устанавливается экспериментально и выражается в виде кривой расхода, которая является эмпирической. Однако организмы и экосистемы могут быть более чувствительны к уровням воды, а не к расходам воды. Это связано с прямым воздействием воды неподвижные элементы биологических систем.

В северных бореальных лесах и в аридных экосистемах исследования влияния гидрологических параметров на прирост деревьев достаточно результативны [8–13]. В экосистемах, находящихся в более мягких климатических условиях и не испытывающих воздействия лимитирующих климатических факторов на прирост деревьев, подобных исследований не проводилось. Например, в настоящее время нет исследований влияния стоковых характеристик рек на годичный прирост деревьев в поймах южной тайги Западной Сибири.

Цель этой работы – оценить как уровни и расходы воды влияют на годичный прирост деревьев, произрастающих в пойме реки Тура в подзоне южной тайги, и оценить, какие гидрологические параметры будут более точно реконструированы с помощью годичных колец.

Материалы и методы исследования

Гидрологические характеристики реки Тура составлены на основе анализа данных, опубликованных в различных источниках. Расходы и уровни воды, даты ледохода и ледостава получены на основе Гидрологических

ежегодников [14, 15], климатические данные загружены с сайта Climate Explorer, версия CRU4.07 период наблюдений 1901–2022 гг. [16–18]; данные по эвапотранспирации с базы данных GLEAM v3.6B (Global Land Evaporation Amsterdam Model) [19] и с сайта Climate Explorer, версия CRU4.07, период наблюдений 1979–2022 гг.; данные по растительному покрову из баз данных GLAD (Global Land Cover and Land Use Change) [20] и Global watersheds [21], период наблюдений 2000–2022 гг.

Район сбора образцов находится на правом берегу реки Тура в подзоне южной тайги 58,4° с.ш. 62,8° в.д. Здесь река формирует большой меандр, часто затапливаемый водой во время весеннего половодья, где произрастают деревья тополя черного (*Populus nigra* L.) и ивы белой (*Salix alba* L.). Буровые образцы (керны) были собраны с деревьев, растущих в пойме вдоль уреза воды, в количестве 50 шт. (ива) и 76 шт. (тополь). Керны были отполированы и измерена ширина древесных колец с помощью Lintab 5.0. Полученные древесно-кольцевые серии были перекрёстно сдатированы с использованием пакетов TSAP [22] и COFECHA [23] с целью определить точный календарный год формирования каждого кольца и выявить ложные или выпадающие кольца. Перекрестная датировка – метод определения календарной даты формирования годичного кольца с помощью сравнения графиков динамики ширины колец и установления максимального соответствия между ними. Полученные древесно-кольцевые серии были стандартизированы и проиндексированы в программе ARSTAN с использованием функций кубического сплайна [24, 25]. В результате индексации путем усреднения были получены древесно-кольцевые хронологии. Для характеристики хронологий использовали стандартные статистические параметры. Самый очевидный – это ширина годичных колец, которая отражает общий природный фон места произрастания деревьев. Коэффициент чувствительности, который вычисляется путем нахождения абсолютного значения разности соседних значений ширины колец, деленной на их среднюю величину, позволяет оценить изменчивость прироста в ответ на динамику условий окружающей среды. Автокорреляция показывает влияние условий предшествующих лет. Для статистического анализа важно уменьшить значения автокорреляции до пренебрежимо малых значений. Для этого каждый ряд «отбеливается» с помощью подходящей модели автокорреляции для временных рядов, в результате создается выбеленная хронология или хронология остатков (residual chronology) [24]. Хронология остатков является основным инструментом, с который используется для дальнейшего анализа данных. Качество полученной хронологии оценивалось при помощи Rbar (коэффициент межсерийной корреляции) и EPS – выраженность популяционного сигнала в хронологии – насколько наша совокупность данных описывает гипотетическую хронологию, построенную бесконечному числу деревьев. Значение EPS, превышающее 0,85, является достаточным, чтобы хронология считалась достоверно представляющей общий сигнал на выбранном местообитании [24].

Для дендроклиматического анализа были использованы месячные данные по температуре и осадкам, полученные с сайта Climate Explorer, версия CRU4.07 период наблюдений 1901–2022 гг. и данные по средним месячным уровням и расходам воды с гидропоста Туринск (1936–2021 гг.), расположенного ниже по течению от места отбора образцов древесины. Статистический анализ проводился с использованием программы Statistica 6.0 и DendroClim2002 [26]. Реконструкции уровней воды выполнены с использованием линейной регрессии. Сравнение актуальных данных и реконструированных уровней, и расходов выполнено в пакете DPL (Dendrochronological Program Library) рутина – VFY [27].

Результаты

Гидроэкологическая характеристика реки Тура. Площадь водосбора реки Тура 80 400 км^2, длина реки – 1030 км, средний расход воды – 202 м^3/с. Река Тура характеризуется выраженным весенним половодьем, повышенным летним стоком, сопровождаемым паводками, и низкой осенне-зимней меженью. Ледоход в среднем наблюдается с 18 апреля ± 8 дней. Максимум весеннего половодья приходится на середину мая (средние

многолетние сроки – 10 мая ± 12 дней). Половодье длится до 2 месяцев, с выраженным пиком в мае. Сроки наступления ледостава – 16 ноября ± 17 дней в среднем, но в XXI веке ледостав наступает позже – 28 ноября ± 11 дней, а в период 1960–1990 гг. река замерзала к 15 ноября. Таким образом, длительность периода открытого русла увеличилась с 205 до 215 дней в последние годы за счет более позднего наступления ледостава. Ширина поймы в районе сбора образцов достигает 8 км, а местами река разливается до 12 км.

Годовое количество осадков на водосборном бассейне в пределах Свердловской области составляет 518 мм в год, а годовая эвапостранспирация – 438 мм. Эвапотранспирация превышает количество осадков в апреле–июле с максимумом в июне-июле (88 мм/месяц соответственно). Расходы в период майского половодья составляют 35 %, в период открытого русла (июнь–сентябрь) – 36 %, в период закрытого русла – 28 %. Средние многолетние значения майских расходов по данным гидропоста Туринск составляют 545 м^3/с, а средние многолетние – 131 м^3/с.

Зависимость уровни–расходы. Большую часть расход воды в реке Тура меняется линейно с изменением уровня. Изменение уровня воды прямо влияет на параметры потока и, следовательно, на его расход. Линейность связи наблюдается, пока река находится в пределах своего русла. Связь между уровнями и расходами за год и за период открытого русла согласуется между собой. В мае линейная зависимость между уровнями и расходами становится меньше. При высоких уровнях воды, например, в половодье, когда вода выходит из русла пойму на заливные луга, связь становится нелинейной. Расходы продолжают увеличиваться, а уровни воды прирастают незначительно. При достижении 700 см уровня и 800 м^3/с расходов река выходит из своего основного русла и заливает пойму и окрестные луга до 8 км. Увеличение уровня реки выше 700 см на 20–30 см ведет к увеличению расходов практически в 1,5 раза до 1500 м^3/с. В период половодья в мае достижение уровня воды высоты 800 см ведет к увеличению расходов до 1000 м^3/с, а в дальнейшем незначительное увеличение уровня ведет к существенному росту расходов (рисунок 1).

Древесно-кольцевые хронологии. В результате измерения ширины годичных колец и перекрестной датировки индивидуальных серий получено, большинство деревьев тополя, несмотря на диаметр более 40 см, оказались молодыми, число колец в них не превышало 40, поэтому они были исключены из анализа. В анализ вошло только 27 деревьев. У ивы белой все образцы были использованы для построения хронологии. Длительность древесно-кольцевой хронологии по тополю черному составила 148 лет (с 1876 г.), а по иве – 143 года (с 1879 г.). Выпадающих и ложных колец на кернах не выявлено. Средняя ширина годичных колец тополя составила 3,8±1,9 (среднеквадратичное отклонение) мм, ивы – 4,4±1,9 мм. Коэффициент межсерийной корреляции показывает сходство между отдельными сериями и составляет 0,60 и 0,61. Коэффициент чувствительности, показывающий относительную величину межгодичной изменчивости прироста, у неиндексированных серий составил 0,35 и 0,33, а у индексированных серий − 0,31 и 0,30 соответственно. Следовательно, деревья имеют среднюю чувствительность к условиям окружающей среды. Средняя автокорреляция в сериях после детрендинга составила 0,22 и -0,1. Корреляция между индексированными сериями (Rbar) оказалась невысокой – 0,56 и 0,51 соответственно. Тем не менее, EPS обобщенных хронологий оказался 0,91 и 0,89 на всем протяжении хронологий. Корреляция между обобщенными хронологиями тополя и ивы достаточно тесная (r= 0,54).

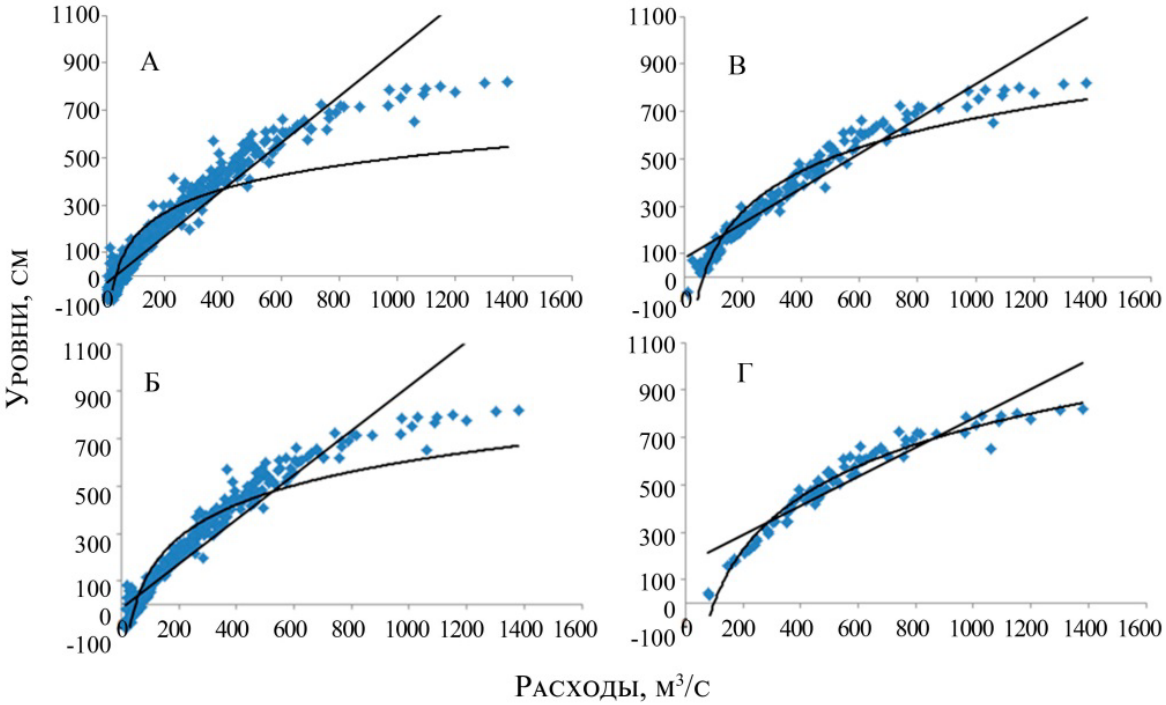


Рисунок 1. Связь между уровнями и расходами за А – весь период наблюдений, Б – период открытого русла, В – период разрушения ледового покрова, Г – период половодья (май). Приведены линейный и логарифмический тренды, описывающие зависимости уровни-расходы

Figure 1. The relationship between water level and discharge for A – full observation period, Б – period of open channel, B – ice cover destruction period, Г – flood period (May). Linear and logarithmic trends describing the water level-discharge relationships are shown

Гидроклиматический анализ. Корреляционный анализ связей ширины годичного кольца с уровнями и расходами воды показал, что на прирост тополя на Туре влияют уровни и расходы воды в мае. На прирост ивы влияют уровни и расходы воды в апреле и мае. В обоих случаях уровни имеют более тесную корреляцию с хронологиями, чем расходы (рисунок 2).

Дополнительно проанализированы связи с температурой воздуха и осадками. Температура мая и июля положительно влияет на ширину годичных колец деревьев, произрастающих на Туре, в период 1936–1970 гг. ($r_{май}$=0,35, $r_{июль}$=0,33), а в период 1970–2023 гг. значимых связей не выявлено. Оценка связей осадками показала, что средние месячные осадки не влияют на ширину годичного кольца. Следовательно, деревья не испытывают дефицита воды.

На основе полученных корреляций были реконструированы уровни и расходы воды. Полученные реконструированные кривые были сравнены с актуальными данными. Результаты приведены в таблице 1. Получено, что обе древесно-кольцевые хронологии лучше реконструирует уровни воды, по сравнению с расходами. Наиболее точные погодичные реконструкции получены для среднего значения уровней воды в апреле–мае по иве белой, где объяснимая дисперсия составила более 24 % за весь период наблюдений и более 26 % за период 1970–2023 гг. Сглаженные 11-летним фильтром ряды имеют более высокие значения объяснимой дисперсии (51–53 %) по уровням воды у обоих видов и очень высокий процент положительных совпадений. Однако, реконструкция расходов по тополю выявила, что расходы воды за период 1970–2017 гг. влияют до 59 % на прирост, но доля совпадений при этом мала. Несмотря на высокую объяснимую дисперсию, качество реконструкции сглаженных расходов, скорее всего, низкое, из-за большой доли несовпадений.

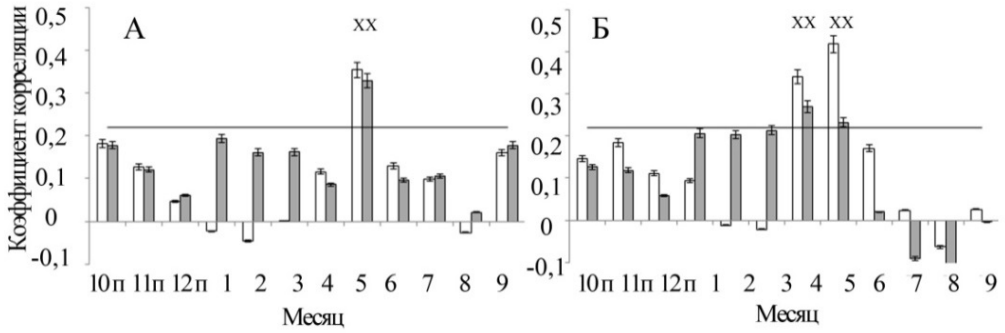


Рисунок 2. Связь между уровнями (белые столбики) и расходами (серые столбики) воды и шириной годичного кольца. А – тополь черный, Б – ива белая. Горизонтальная линия – уровень значимости, x – достоверные значения, p-level < 0,05

Figure 2. Relationship between water levels (white bars) and discharges (gray bars) and tree-ring width. A – black poplar, B – white willow. The horizontal line – significant level. x – significant values, p-level < 0,05

Таблица 1. Сравнение реконструированных и актуальных значений уровней и расходов. * – статистически достоверные значения. R^2 – объяснимая дисперсия, *r* – коэффициент корреляции, RE – коэффициент уменьшения ошибки, t-value – T тест, Sign test – тест знаков: «+» – число случаев совпадения, «-» – расхождения, * – статистические достоверные. Жирным выделены значения наибольшей объяснимой дисперсии, жирным курсивом – высокая дисперсия, но низкая доля совпадений (sign test)

Table 1. Comparison of reconstructed and actual values of river levels and discharge of water. * – statistically significant values. R^2 – explained variance, *r* – correlation coefficient, RE – reduction of error coefficient, t-value – T test, Sign test – "+" – matches positive, "-" – matches negative, * – statistically significant values. Bold – the highest explained variance, bold italics – high explained variance, but low matches positive (sign test)

Род дерева, месяц	Параметр	Период	R^2	*r*	RE	t-value	Sign test
Ряды погодичных данных							
Populus, май	Уровни	1936-2023	0,15	0,39*	0,15*	2,81*	54+/34-
	Расходы	1936-2021	0,10	0,32*	0,11*	2,21*	57+/29-
Salix, апрель-май	Уровни	1936-2023	0,24	0,49*	0,24*	2,39*	58+/27-
	Расходы	1936-2021	0,19	0,43*	0,19*	2,65*	58+/27-
Populus, май	**Уровни**	**1970-2023**	**0,26**	**0,51***	**0,20***	**2,22***	**31+/23-**
	Расходы	1970-2021	0,17	0,41*	0,11*	1,71	33+/19-
Salix, апрель-май	**Уровни**	**1970-2023**	**0,37**	**0,61***	**0,31***	**3,04***	**34+/20-**
	Расходы	1970-2021	0,27	0,52*	0,21*	2,88*	32+/20-
Сглаженные 11-летним фильтром ряды							
Populus, май	Уровни	1942-2017	0,10	0,32*	0,11*	2,61*	41+/35-
	Расходы	1942-2015	0,12	0,35*	0,09*	4,11*	37+/37-
Salix, апрель-май	**Уровни**	**1942-2017**	**0,51**	**0,71***	**0,40***	**6,70***	**42+/6-**
	Расходы	1942-2015	0,19	0,43*	0,19*	2,65*	61+/27-
Populus, май	**Уровни**	**1970-2017**	**0,53**	**0,73***	**0,31***	**6,23***	**41+/7-**
	Расходы	***1970-2015***	***0,59***	***0,77****	***0,08****	***2,68****	***26+/20-***
Salix, апрель-май	***Уровни***	***1970-2017***	***0,51***	***0,71****	***0,11****	***3.39****	***20+/28-***
	Расходы	1970-2015	0,41	0,64*	0,07*	3,24*	21+/25-

На рисунке 3 приведено графическое сравнение погодичной реконструкций уровней и расходов воды по ширине годичных колец с измеренными значениями. Получено, что реконструкции уровней воды гораздо чаще описывают максимальные значения уровней,

тогда как по расходам чаще встречается недооценка или переоценка пиковых значений (рисунок 3 Б, Г). Во всех реконструкциях отмечена недооценка экстремальных значений минимальных уровней и расходов воды с использованием хронологии по тополю. По иве получены более точные реконструкции уровней воды экстремальных лет.

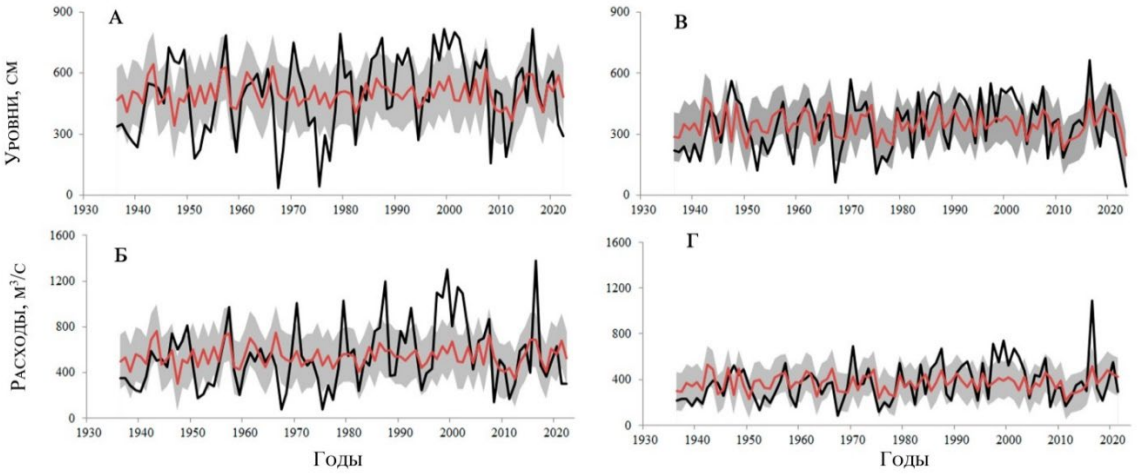


Рисунок 3. Графическая оценка реконструкции уровней (А, В) и расходов воды (Б, Г) древесно-кольцевыми хронологиями: А, Б – тополь черный (май), В, Г – ива белая (апрель-май). Черная линия – измеренные значения, красная – реконструированные. Заливка серым – доверительный интервал 5–95 %

Figure 3. Graphical assessment of the reconstruction of water levels (A, B) and water discharges (B, Г) using tree-ring chronologies: А, Б – black poplar (May), В, Г – white willow (April-May). Black line – measured values, red line – reconstructed values. Gray filling – confidence interval 5–95 %.

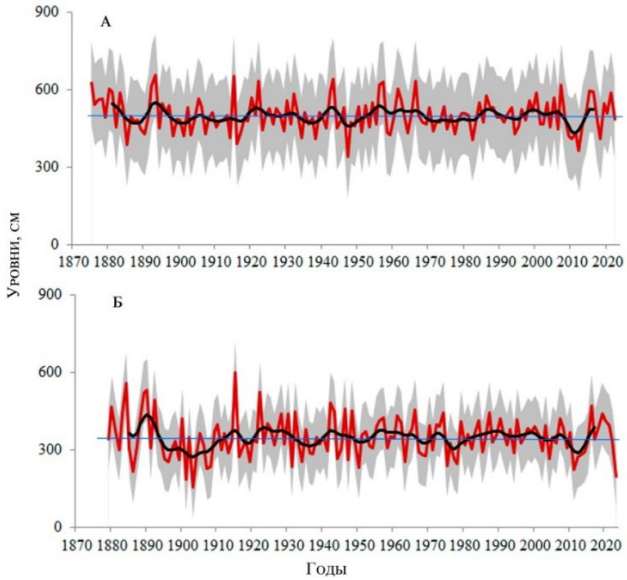


Рисунок 4. Реконструкции уровней воды древесно-кольцевыми хронологиями: А – тополь черный (май), Б – ива белая (апрель-май). Красная линия – измеренные значения, черная – сглаженные 11-летним фильтром, синяя горизонтальная линия – средние значения. Заливка серым – доверительный интервал 5–95 %

Figure 4. Reconstructions of water levels, based on tree-ring chronologies: А – black poplar (May), Б – white willow (April-May). Red line – reconstructed values, black line – 11-year smoothed values, blue line – mean value. Gray filling – confidence interval 5–95 %

На рисунке 4 приведена реконструкция ежегодных уровней воды и их сглаженных 11-летним фильтром значений. Учитывая, что значения EPS становятся выше 0,85 с самого начала хронологии, то можно использовать всю длину хронологии для анализа. Благодаря сглаживанию, удалось выделить периоды с низкими и высокими уровнями воды, как в мае, так и в апреле–мае. Периоды с приростом выше средних многолетних значений у обоих видов отмечены в 1885–1895 гг. и в 1920–1930 гг., эти периоды соответствуют периодам с высокой водностью. Периоды с угнетением прироста отмечены в 1895–1915 гг. и 1930–1935 гг. В эти периоды уровень воды был скорее низким. В хронологии ивы периоды снижения уровня воды более выражены, чем в хронологии тополя.

Обсуждение

Река Тура является одной из крупнейших рек Свердловской области с широкой поймой. Сроки разрушения ледового покрова и начало ледохода происходят в среднем апреле, а весеннее половодье - в мае. Во время весеннего половодья река широко разливается и достаточно часто выходит за пределы бровки своего русла, формируя заливные луга. В этот же период река оказывает существенное влияние на прирост деревьев, произрастающих в пойменных местообитаниях.

Произрастая в сходных местообитаниях вдоль уреза воды, тополь и ива имеют близкие характеристики динамики изменения ширины годичных колец. Тем не менее, гидроклиматический сигнал, содержащийся в годичных кольцах, различен. Эти различия обусловлены на наш взгляд тем, что ива начинает вегетацию несколько раньше и, соответственно, для формирования ширины годичных колец важным является уровни и расходы воды в апреле и мае. Тополь – более теплолюбивый вид, здесь проходит его северная граница распространения [28], поэтому начало формирования годичного кольца наступает позднее, чем у ивы и это отражается в связях только с уровнями и расходами воды в мае.

Более тесная связь радиального прироста *Populus nigra* и *Salix alba* в пойме реки Тура с уровнями воды, а не с её расходами связана, по нашему мнению, с гидравлическими особенностями поймы реки Тура в этом месте. В данном меандре при превышении уровнями воды отметок русловой бровки, происходит растекание потока до 8 км в ширину. Это приводит к выраженной нелинейности в соотношении «уровень-расход» [29]. Для деревьев, в свою очередь, ключевым фактором, влияющим на ширину годичного кольца, становится непосредственно продолжительность и глубина затопления слоем воды в период весеннего половодья, который точнее характеризуется уровнем, а не интегральным расходом в главном русле. На других местообитаниях, где вода не покидает пределов речного русла, уровни и расходы воды скорее будут влиять одинаково на годичный прирост. Но поскольку тополь черный и ива белая, предпочитают селиться на временно заливаемых участках поймы, то их чувствительность к уровню, а не к расходу воды, будет выше на подобных местообитаниях.

Выполненные реконструкции уровней воды выглядят точными, начиная с 1970 года. Возможно, это связано с унификацией и стандартизацией данных в этот период и улучшением качества измерений в последующие годы [30]. Другой причиной расхождения реконструкции и наблюдений за уровнями воды до 1970 года могут быть особенности динамики климата в предшествующие десятилетия (1940–1960 гг.), когда влияние температуры могло быть сильнее, чем влияние уровней и расходов воды. Однако, несмотря на различия в коэффициентах корреляции между температурой и шириной годичного кольца за период 1936–1970 и 1970–2023 гг., статистически достоверных температурных различий в эти периоды не выявлено. Средняя температура мая–июня в эти периоды составила 14,5±4,5 ºС и 14,7±4,3 ºС соответственно. Кроме этого, важным фактором, влияющим на прирост деревьев, является запас воды в почве. Оба вида деревьев чувствительны к запасам почвенной влаги и доступностью воды в почве [31–35]. Поскольку прослеживается влияние нескольких факторов, то иногда наблюдаются несовпадения между реконструированными рядами и измеренными значениями.

Фактические максимальные или минимальные значения прироста иногда не соответствуют максимальным или минимальным значениям уровней воды. Например, 1947, 1984 и 1999 гг. являются годами с высоким значением уровней воды, но в эти годы отмечено уменьшение прироста до средних значений. Возможно, длительное затопление напрямую определяет условия вегетации и наступление водного стресса у изучаемых видов. В 1952, 1959 и 1967 гг. отмечены широкие кольца относительно средних значений, а уровни воды – наименьшие, то есть в эти годы существует переоценка уровней воды предложенной моделью. Остальные годы с минимальными и максимальными уровнями реконструированы достаточно точно.

Согласно полученной реконструкции, можно выделить период с 1895 года по 1915 год с низкими уровнями воды в реке Тура. Это один из самых длительных периодов с низкой водой за время, охватываемое хронологиями. В этот период у обоих видов отмечено существенное уменьшение прироста, следовательно, снижение уровня воды в период весеннего половодья было существенным. Тем не менее, снижение уровня воды в мае, согласно реконструкции, не достигало современных значений, зафиксированных в период 2010–2015 гг.

Годы с высокой водностью, способствующей приросту тополя – 1892, 1893, 1915 и 1922 гг., а по хронологии ивы − 1884, 1889, 1890, 1892, 1915 и 1922 гг. Учитывая особенности роста ивы и тополя, можно предположить, что в 1892, 1915, и 1922 гг. наблюдались высокие уровни воды в апреле и мае. Условия, угнетающие прирост у обоих видов, и, возможно, сопровождающиеся низкими уровнями воды в мае − в 1914, 1916 и 1934 годах. Но следует быть осторожными при оценке отдельных лет с узкими годичными кольцами и не исключать вариант, что экстремально высокое половодье могло оказать отрицательное воздействие на годичный прирост, в результате чего некоторые годы с узкими кольцами могут не соответствовать значениям минимальных уровней и расходов воды.

Заключение

Проведенное исследование позволило установить закономерности влияния гидрологического режима реки Тура на радиальный прирост пойменных деревьев. В результате анализа выявлено, что динамика уровней воды лучше регистрируется годичными кольцами деревьев тополя черного и ивы белой по сравнению с расходами воды. Это обусловлено процессами, происходящими в период весеннего половодья в широкой пойме реки Тура, где при выходе воды из русла связь «расход–уровень» становится нелинейной. В этих условиях именно уровень воды, а не интегральный расход в главном русле, является адекватным показателем влияния продолжительности и глубины затопления пойменной террасы на годичный прирост деревьев.

На основе древесно-кольцевых хронологий выявлены периоды с высокими и низкими уровнями воды и экстремальные годы с высокой и низкой водностью за период, предшествующий инструментальным наблюдениям. Древесно-кольцевые хронологии *Populus nigra* L. и *Salix alba* L., произрастающих в пойменных местообитаниях реки Тура в условиях южной тайги Западной Сибири, демонстрируют хороший потенциал в качестве индикаторов динамики гидрологического режима, позволяют продлить гидрологические ряды и выявить периоды с высокой и низкой водностью. Разработанные модели позволяют использовать дендрохронологический метод для ретроспективной оценки динамики режима уровней реки Тура, что имеет фундаментальное значение для понимания долгосрочных изменений гидроклиматической системы и прогнозирования ее состояния в условиях современного изменения климата.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ 24-27-20081.

Acknowledgements

This work was supported by the Russian Science Foundation on project 24-27-20081.

Литература / References

1. Bulygina O.N., Razuvaev V.N. Daily Temperature and Precipitation Data for 518 Russian meteorological stations (1881–2010). Oak Ridge, TN: Oak Ridge National Laboratory. 2012. №. osti: 1394916. DOI: 10.3334/CDIAC/CLI. 100.
2. Tveito O.E. The effect of homogenization when constructing long-term gridded monthly precipitation and temperature data. International Journal of Climatology, 2023, vol. 43, no. 16, pp.7618–7632.
3. WMO guidelines on homogenization. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization. Technical report WMO-No. 1245. 2020. 54 p.
4. Agafonov L.I., Gurskaya M.A. The Influence of the Lower Ob River Runoff on Radial Growth of Trees. Contemporary Problems of Ecology, 2013., vol. 6, no. 7, pp. 779–787. DOI:10.1134/S1995425513070159.
5. Agafonov L.I., Meko D.M., Panyushkina I.P. Reconstruction of Ob River, Russia, discharge from ring widths of floodplain trees. J. of Hydrology, 2016, vol. 543, pp. 198–207. DOI:10.1016/j.jhydrol.2016.09.031.
6. Karanitsch-Ackerl S., Mayer K., Gauster T., Laaha, G., Holawe F., Wimmer R., Grabner M. A. 400-year reconstruction of spring–summer precipitation and summer low flow from regional tree-ring chronologies in North-Eastern Austria. J. of Hydrology. 2019, vol. 577. pp. 123986. DOI:10.1016/j.jhydrol.2019.123986.
7. Woodhouse C.A., Gray S.T., Meko D.M. Updated streamflow reconstructions for the Upper Colorado River Basin. Water Resource Research 42, 2006, vol.42, no. 5. W05415. DOI:10.1029/2005WR004455.
8. Güner H.T., Kose N., Harly G.T. A 200-year reconstruction of Kocasu River (Sakarya River Basin, Turkey) streamflow derived from a tree-ring network. Int. J. Biometeorol., 2017, vol. 61, pp. 427–437. DOI:10.1007/s00484-016-1223-y.
9. Bakhtiyorov Z., Chen F., Chen Y. Wang, S., Zhang, H., Hu, M. Yue W., Habibulloev S., Kavtaradze G., Gurskaya M., Agafonov L., Rahmonov O., Roibu C.-C. Akkemik U., Köse N., Norman C. Historical drivers and future streamflow variations of the Kura River in the Western Transcaucasia region of Georgia: Analysis of tree-ring chronologies from 1720 to 2021 CE. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2024, vol. 655, p. 112529. DOI:10.1016/j.palaeo.2024.112529.
10. Gao Z., Zhang H., Chen F. Satylkanov R., Ermenbaev B., Bakhtiyorov Z., Zhang R., Yu S., YUE W., Zhao X. Tree-ring based streamflow reconstruction of the Chu River in Kyrgyzstan over the past 407 years. Quaternary Sciences, 2022. vol. 42. no. 1, pp. 288–301. DOI: 10.11928/j.issn.1001-7410.2022.01.23.
11. MacDonald G.M., Kremenetski K.V., Smith L.C., Hidalgo H.G. Recent Eurasian river discharge to the Arctic Ocean in the context of longer-term dendrohydrological records. J. Geophysical Research: Biogeosciences. 2007. vol.112. G04S50. DOI:10.1029/2006JG000333.
12. Meko D.M., Panyushkina I.P., Agafonov L.I., Edwards J.A. Impact of high flows of an Arctic river on ring widths of floodplain trees. The Holocene, 2020, vol. 30, no. 6, pp. 789–798. DOI:10.1177/0959683620902217.
13. Gou X., Chen F., Cook E., Jacoby G., Yang M., Li J. Streamflow variations of the Yellow River over the past 593 years in western China reconstructed from tree rings. Water Resources Research, 2007, vol. 43, W06434. DOI:10.1029/2006WR005705.
14. Гидрологический ежегодник 1936–1954, ГУГМС. Л.: Гидрометеоиздат, 1937–1955, Т.6. Вып. 0–9.
15. Гидрологический ежегодник 1955–2023. Омск: ГУГМС, Обь-Ирт. УГМС, 1956–2018, Т. 1. Вып. 10–11.
16. Fick S.E., Hijmans R.J. “WorldClim 2: New 1-km Spatial Resolution Climate Surfaces for Global Land Areas.” International Journal of Climatology, 2017, vol. 37, no. 12, pp. 4302–15. DOI:10.1002/joc.5086.

17. Harris I., Osborn T.J., Jones P. Lister D. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. Scientific Data, 2020, vol.7, no. 109. DOI:10.1038/s41597-020-0453-3.
18. Osborn T.J., Jones P.D., Lister D.H., Morice C.P., Simpson I.R., Winn J.P., Hogan E., Harris I.C. Land surface air temperature variations across the globe updated to 2019: The CRUTEM5 data set. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2021, vol. 126., no. 2. C. e2019JD032352.
19. Martens, B., Miralles, D.G., Lievens, H., Schalie R., Jeu R.A.M. Fernández-Prieto D., Beck H.E., Dorigo W.A., Verhoest N.E.C. GLEAM v3: satellite-based land evaporation and root-zone soil moisture. Geoscientific Model Development, 2017, vol. 10, pp. 1903–1925. DOI:10.5194/gmd-10-1903-2017.
20. Potapov P., Hansen M.C., Pickens A., Hernandez-Serna A, Tyukavina A., Turubanova S., Zalles V., Li X., Khan A., Stolle F., Harris N., Song X., Baggett A., Kommareddy I., Kommareddy A. The global 2000-2020 land cover and land use change dataset derived from the Landsat archive: first results. Frontiers in Remote Sensing, 2022. DOI:10.3389/frsen.2022.856903.
21. Giachetta E., Willett S. D. A global dataset of river network geometry. Scientific data, 2018, vol. 5, iss. 1, p. 180127.
22. Rinn F. TSAP Time Series Analysis and Presentation. Version 3.0. Reference Manual / F. Rinn. Heidelberg. 1996. 262 p.
23. Holmes R.L. Computer-assisted quality control in tree ring dating and measurement. Tree-Ring Bul., 1983, vol. 43, pp. 69–78.
24. Bitvinskas T., Briffa K., Cook E., Downing D.J., Dubinskaite J., Eckstein D., Fritts H.C., Gordon G.A., Guiot J., Jones J. I. PH., Jagels R., Jones PH., Kairiukstis L., Kincaid W.B., Kocharov G., Kolishchuk V.G., Mazepa V.S., Mclaughlin S.B., Molenaar J., Nash III T.H., Norton D., Ogden J., PILCHER J., Robinson W.J., Schweingruber F., Serre-Bachet F., Shiyatov S.G., Telewski F., Tessier L., Vaganov E.A., Visser H., Worbes M. Methods of dendrochronology: applications in the environmental sciences. (Cook E., Kairiukstis L. Eds.) Springer Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. 1990. 394 p. DOI:10.1007/978-94-015-7879-0.
25. Cook E. R., Krusic P. J., Holmes R. H., Peters K. Program Arstan. Version, 2005, vol.1, p. 72.
26. Biondi F., Waikul K. DENDROCLIM2002: A C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. Computers & geosciences, 2004, vol. 30, no 3, pp. 303–311.
27. Holmes R.L. Dendrochronology Program Library, Instruction and Program Manual //Tucson: Laboratory of Tree-Ring Research, University of Ari. 1992. 51 p.
28. GenRes Bridge Project Consortium, ECPGR, ERFP and EUFORGEN // Genetic Resources Strategy for Europe. 2021. URL: http://www. genresbridge. eu/GRS4E.
29. Knighton D. Fluvial forms and processes: a new perspective. Routledge. 2014. 400 p. DOI:10.4324/9780203784662.
30. Потапова О.Н. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам // Л.: Гидрометеоиздат. 1978. №. 6. 384 с.
31. Dudek D.M., McClenahen J.R., Mitsch W.J. Tree growth responses of Populus deltoides and Juglans nigra to streamflow and climate in a bottomland hardwood forest in central Ohio. The American midland naturalistб 1998б vol. 140б no. 2б pp. 233–244. DOI:10.1674/0003-0031(1998)140[0233:TGROPD]2.0.CO;2.
32. Malik I., Dłużewski M., Rotnicka J., Wistuba M., Krzemień K., Muszyński A., Rojan E., Ślęzak A. Simultaneous growth releases and reductions among Populus alba as an indicator for floods in dry mountains (Morocco). Ecological I.ndicators, 2021, vol. 129, p. 107874. DOI:10.1016/j.ecolind.2021.107874

33. Liu P.X., Peng J.F., Chen F.H. Hydrological response of Populus euphratica Olve. radial growth in Ejinaa banner, inner Mongolia. Journal of Integrative Plant Biology, 2007, vol. 49, no. 2, pp. 150–156. DOI:10.1111/j.1744-7909.2007.00425.x.

34. Zhang R., Qin L., Yuan Y., Gou X., Zou C., Yang Q., Shang H., Fan Z. Radial growth response of Populus xjrtyschensis to environmental factors and a century-long reconstruction of summer streamflow for the Tuoshigan River, northwestern China. Ecological Indicators, 2016, vol. 71, pp. 191–197. DOI:10.1016/j.ecolind.2016.06.035.

35. Lambs L., Loubiat M., Girel J., Tissier J., Peltier J. P., Marigo G. Survival and acclimatation of Populus nigra to drier conditions after damming of an alpine river, southeast France. Annals of Forest Science, 2006, vol. 63, no 4, pp. 377–385. DOI:10.1051/forest:2006018.

Поступила в редакцию / Received 21.11.2025
Принята к публикации / Accepted 07.12.2025

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гурская Марина Анатольевна, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, Институт экологии растений и животных УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия, SPIN-код: 7010-1752, https://orcid.org/0000-0001-5815-7228, ResearcherID ABF-1384-2020, Author ID Scopus: 6507383427, e-mail: mgurskaya@yandex.ru.

Агафонов Леонид Иванович, доктор биологических наук, заведующий лабораторией, Институт экологии растений и животных УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия, SPIN-код: 1809-2486, https://orcid.org/0000-0003-4595-4978, ResearcherID O-7755-2014, Author ID Scopus: 6603717263, e-mail: lagafonov@ipae.uran.ru.

Ермоленко Максим Олегович, магистрант, Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, Россия, e-mail: yermaxim@yahoo.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Marina A. Gurskaya, D.Sc (Biology), Leading Researcher, Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia, SPIN-code: 7010-1752, https://orcid.org/0000-0001-5815-7228, ResearcherID ABF-1384-2020, Author ID Scopus: 6507383427, e-mail: mgurskaya@yandex.ru.

Leonid I. Agafonov, D.Sc (Biology), Head of Laboratory, Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia, SPIN-code: 1809-2486, https://orcid.org/0000-0003-4595-4978, ResearcherID O-7755-2014, Author ID Scopus: 6603717263, e-mail: agafonov@ipae.uran.ru.

Maxim O. Yermolenko, master student, Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia, e-mail: yermaxim@yahoo.com.

Научная статья / Scientific paper
УДК: 556
DOI: 10.34753/HS.2025.7.3.286

Статистические аспекты оценки определения расходов воды химическим методом

Т.Н. Синцова*, А.П. Лепихин
Горный институт УрО РАН, г. Пермь, Россия
e-mail: *tanya_sinzova@mail.ru

Аннотация. Целью исследования является оценка погрешностей измерения расходов воды в водотоках химическим методом. Выявлено, что неустойчивость в измерениях расходов воды при залповом и постоянном сбросах концентрации маркера связана с несостоятельностью оценок среднеарифметических значений, так как их функции распределения описываются обратным нормальным распределением и обусловлена структурой используемых расчетных зависимостей, при этом колебания расходов воды описываются обратным нормальным распределением, для которого оценки средних значений и дисперсий несостоятельны. Соотношение по оценке расходов воды содержит в знаменателе значения концентрации маркера, представляющие собой, в общем случае, случайную величину. Если ее изменчивость определяется только погрешностями измерений и мелкомасштабными турбулентными пульсациями, то колебания концентрации маркера будут описываться нормальным распределением, а расчетная величина расходов воды должна описываться обратным нормальным распределением.

В результате математического моделирования погрешностей измерений расходов воды по схеме Монте–Карло рассчитано, что при низкой изменчивости концентрации маркера их оценки состоятельны. Выявлено, что при низкой изменчивости концентрации маркера CvC < 0,1 их оценки состоятельны, а при CvC > 0,25 – неустойчивы. Горные реки, на которые в первую очередь ориентируются рассматриваемые методы оценки расходов воды, характеризуются как высокой турбулентностью, так и быстрой временной изменчивостью расходов воды. Поэтому расстояние от места ввода маркеров до контрольного створа должно обеспечивать достаточно равномерное и полное смешение маркера по поперечному сечению потока, при этом характерное время отслеживания изменения концентраций в контрольном створе при мгновенном введении маркера должно быть много меньше характерной временной изменчивости самого расхода воды.

Предложены эффективные способы для повышения устойчивости измерений расходов воды, уменьшения колебаний измеряемых концентраций в контрольном створе: увеличение расстояния от начального до контрольного створов, использование гирлянд из датчиков.

Ключевые слова: метод смешения; функция распределения; несостоятельность; расход воды.

Для цитирования: Синцова Т.Н., Лепихин А.П. Статистические аспекты оценки определения расходов воды химическим методом // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2025. Т. 7. Вып. 3. С. 286–295. DOI: 10.34753/HS.2025.7.3.286.

Statistical Aspects of the Assessment Water Discharge Using the Tracer Dilution Method

Tatyana N. Sintsova*, Anatoly P. Lepikhin
Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia
e-mail: *tanya_sinzova@mail.ru

Abstract. The aim of this study is to assess the errors in measuring water discharge in streams using the dilution method. Instability in water discharge measurements during instantaneous and continuous tracer injections arises from the inconsistency of arithmetic mean estimators. This occurs because the distribution functions follow an inverse normal distribution, which results from the structure of the calculation formulas. Furthermore, discharge fluctuations follow an inverse normal distribution, for which estimates of mean values and variances are inconsistent. The ratio for estimating water flow contains tracer concentrations in the denominator, which are generally random variables. If its variability is determined solely by measurement errors and small-scale turbulent

fluctuations, then the tracer concentrations fluctuations will be normally distributed, and the calculated discharge will follow an inverse normal distribution.

Mathematical modeling of water flow measurement errors using a Monte Carlo simulation showed that, with low marker concentration variability, their estimates are consistent. It was found that, at low tracer concentration variability (CvC < 0.1), their estimates are stable, while at CvC > 0.25, they are unstable. Mountain rivers, which are primarily targeted by the considered methods for estimating water discharge, are characterized by both high turbulence and rapid temporal variability in water discharge. Therefore, the distance from the tracer injection site to the control section should ensure sufficiently uniform and complete mixing of the marker across the flow cross-section. Furthermore, the characteristic time for tracking changes in concentrations at the control section with instantaneous tracers' injection should be significantly shorter than the characteristic temporal variability of the water discharge itself.

Effective methods for improving the stability of water discharge measurements and reducing fluctuations in measured concentrations at the control section are proposed: increasing the distance between the injection and control section, and using sensor arrays.

Keywords: mixing method; distribution function; inconsistency; water discharge.

For citation: Sintsova T.N., Lepikhin A.P. Statistical Aspects of the Assessment Water Discharge Using the Tracer Dilution Method. Hydrosphere. Hazard processes and phenomena, 2025, vol. 7, iss. 3, pp. 286–295. DOI: 10.34753/HS. 2025.7.3.286. (In Russian; abstract in English).

Введение

При решении практических задач достаточно часто возникает необходимость оценки расходов воды в водотоках, поперечное сечение русел которых имеет сложную геометрическую форму. Использование традиционных методов измерений[1][2], построенных на оценке средней скорости течения и площади поперечного сечения, вызывает значительные сложности. Если поток имеет простую геометрическую форму и распределение скорости потока описывается достаточно гладкой функцией, то оценка расхода воды не представляет каких-либо проблем. В прямоугольном линейном канале достаточно часто применяются упрощенные способы измерений скорости потока, иногда даже с использованием всего одной промерной точки[2]. Чем сложнее геометрия поперечного сечения русла, тем большее количество точек измерения скорости потока требуется использовать[1]. Однако даже в установившихся потоках часто возникают технические сложности при измерении скорости потока более многоточечным способом.

Наиболее простой и очевидный подход к решению данной проблемы – совершенствование системы измерения скорости течения воды. Сейчас наибольшее распространение получила система измерения, построенная на совмещении эхолотов с доплеровскими акустическими измерителями скорости потока[3]. Однако при этом методе измерения остается проблема дискретности измерения глубины и ширины. Для горных рек с очень сложным поперечным сечением данные методы измерения могут давать неприемлемо высокую погрешность, поэтому для водных объектов с очень сложной морфометрией необходимо применение принципиально других подходов, не связанных с пространственно-временной дискретностью измерений.

Для решения этих задач рекомендуется использовать химический метод, который не требует задания скорости течения и площади поперечного сечения. В настоящее время современное название химического метода –

[1] Методические указания. ГСИ. Расход воды на реках и каналах. Методика выполнения измерений методом «скорость - площадь». МИ 1759-87. Изд. стандартов. М. 1987. 25 с.

[2] СТО 4.2-3-2015 Мелиоративные системы и сооружения. Открытые каналы. Правила определения расхода воды с использованием метода одноточечного измерения скорости потока. Новочеркасск. РосНИИПМ. 2015. 36 с.

[3] РД 52.08.767-2012 Расход воды на водотоках. Методика измерений акустическими доплеровскими профилографами "Stream Pro" и "Rio Grande" / Министерство природных ресурсов и экологии РФ; Росгидромет. С.-П.: Нестор-История. 2012.

методы ионного паводка и постоянного пуска солевого раствора[4], при этом они не оказывают негативного воздействия на водные объекты, что подтверждается исследованиями на основе комплексного воздействия соляных пусков на окружающую среду [1], водную растительность [2] и микроорганизмы [3]. Химический метод используется в качестве метода внедрения объема индикатора в исследуемый водный поток для прогностического расчета концентраций загрязняющих веществ при имитации аварийного сброса сточных вод, залпового сброса при транспортной аварии[5]. Хотя сам химический метод известен уже более 150 лет [4–6], а его практическая реализация не требует значительной технической оснащенности, однако его широкое практическое использование в настоящее время существенно сдерживается нестабильностью результатов измерений, что подтверждается работами [7–9]. Оценка корректности измерения расходов воды в реках химическим методом в общем случае включает в себя следующие три взаимосвязанных аспекта: технологический, гидравлический и статистический.

В настоящее время основное внимание уделяется только первым двум аспектам. При этом технологический аспект включает в себя комплекс работ по введению маркера в водоток и его эффективную регистрацию в фоновом и контрольном створах. Гидравлический аспект направлен на обеспечение максимального полного перемешивания маркера с водой водотока на участке от фонового до контрольного створа. В то же время в объяснении существенной нестабильности результатов измерений расходов воды этим способом статистические аспекты должны играть принципиальную роль. Использование методов статистического анализа при решении прикладных задач, как правило, априорно основано на допущении, что статистические оценки рассматриваемых переменных состоятельны, т.е. дисперсии их оценок при неограниченном увеличении объема выборки стремятся к нулю. Существенную роль эти эффекты играют при определении расходов воды химическим методом (методом смешения), описывающихся обратным нормальным распределением, для которого несостоятельны оценки средних значений, дисперсий и более высоких моментов согласно [10–11], при наличии случайного процесса в знаменателе расчетных соотношений, в данном случае концентрации маркера (вещества). Целью исследования является оценка корректности измерения расходов воды в реках химическим методом при их залповом и постоянном сбросах.

Материалы и методы исследования

В работе используется основное положение, что колебания расходов воды $Q(t)$ нельзя рассматривать как нормально распределенную величину, они должны описываться обратным нормальным распределением, для которого не существует первого, второго и более высоких моментов:

$$\langle Q \rangle = \overline{Q} = \left\langle \frac{G}{C_k} \right\rangle \neq \frac{G}{\langle C_k \rangle}, \qquad (1)$$

соответственно,

$$\left\langle \frac{G}{T_N \sum_i^N C_{ki}} \right\rangle \neq \frac{G}{T_N \left\langle \sum_i^N C_{ki} \right\rangle}, \qquad (2)$$

где T_N – продолжительность измерений концентраций; $\langle\ \rangle$ – обозначение среднего значения; $C_к$ – концентрация маркера в контрольном створе, мг/л; G – интенсивность поступления концентрации маркера, кг/с.

Как показано [10–11] характерной особенностью обратных нормальных распределений является то, что даже оценки средних арифметических значений, описываемые данной функцией распределения, являются

[4] Рекомендации Р 52.08.930-2023 Измерение расхода воды методами ионного паводка и постоянного пуска солевого раствора. ФГБУ «ГГИ». С.-П. 2023. 84 с.

[5] Рекомендации Р 52.24.627-2007 Усовершенствованные методы прогностических расчетов распространения по речной сети зон высокозагрязненных вод с учетом форм миграции наиболее опасных загрязняющих веществ. Росгидромет. ГУ ГХИ. Ростов-на-Дону. 2007. 168 с.

несостоятельными, т. е. их дисперсия не уменьшается с увеличением измерений. Это очень серьезное фундаментальное ограничение повышения надежности измерений расходов воды при использовании данной схемы, оно объясняет наблюдаемую нестабильность в измерениях расходов воды.

Результатами моделирования являются значения относительной среднеквадратической погрешности измерения расходов воды химическим методом при постоянном (метод постоянного пуска солевого раствора) и залповом (метод ионного паводка) сбросах маркера в водоток. Объектом исследования являются смоделированные ряды наблюдений концентраций маркера в контрольном створе по схеме Монте-Карло при объеме выборок N~10^5 для различных значений коэффициентов вариации в диапазоне 0,1–0,9.

Оценка расходов воды химическим методом, при постоянном введении маркера в водоток, основывается на следующем балансовом соотношении:

$$q_{сб} \cdot C_{сб} + Q \cdot C_{ф} = (Q + q_{сб}) \cdot C_{к}, \quad (3)$$

где $q_{сб}$ – расход жидкости, используемой при введении маркера в водоток, м^3/с; $C_{сб}$ – исходная концентрация маркера, мг/л; Q·– расход воды рассматриваемого водотока, м^3/с; $C_{ф}$ – фоновая концентрация маркера в водотоке, мг/л.

При выполнении неравенства

$$\frac{q}{Q} << 1, \frac{C_{ф}}{C_{к}} << 1, \quad (4)$$

расход воды при постоянном сбросе маркера в водоток (при постоянном пуске солевого раствора) согласно (3) имеет вид

$$Q \approx \frac{q_{сб} \cdot C_{сб}}{C_{к}}. \quad (5)$$

Если (4) не выполняется с требуемой надежностью, то расход воды определяется

$$Q \approx \frac{q_{сб} \cdot (C_{сб} - C_{к})}{(C_{к} - C_{ф})}. \quad (6)$$

При залповом сбросе маркера в водоток (при использовании метода ионного паводка) расход воды находится как

$$Q(t) \approx \frac{G}{\sum \Delta t_i C_{кi}(t)}, \quad (7)$$

где $C_{кi}$ – измеряемые значения i концентрации маркера в контрольном створе за интервал времени Δt_i, кг/м^3.

При этом нетрудно видеть, что находящаяся в знаменателе величина $\sum_i^N C_{ki}$ является случайной. Если колебания C_{ki} определяются только стандартной ошибкой измерения, то их величина должна иметь нормальное распределение, а сами оценки робастными. В этом случае наилучшей оценкой определяющего параметра является среднее арифметическое значение, имеющей при данном объеме выборки минимальную погрешность.

Надежность выполнения данных соотношений (5)–(7) определяется эффективностью полного перемешивания маркера в водотоке. Интересно отметить, что первый вариант кандидатской диссертации А.В. Караушева, подготовленный еще в довоенный период под руководством В.М. Маккавеева, был посвящен оценке процессов разбавления для решения задач реализации химического метода измерения расходов воды. Так как, как правило, в естественных водотоках $H << B$ (H – глубина, B – ширина водотока), то определяющим фактором является интенсивность процессов поперечной дисперсии. Если коэффициенты турбулентной диффузии в водотоках, хотя бы в первом приближении, могут рассматриваться как изотропные, то коэффициенты поперечной, обусловленные Тейлоровской диффузией, могут существенно различаться. Данное положение подтверждается многочисленными натурными оценками, их анализ дается в [10, 12–13]. При этом на характер поперечного перемешивания существенное влияние может оказывать также формирование в водотоке течений второго рода по Прандтлю, а также возможных стратификационных эффектов.

В современной литературе очень широко обсуждаются наблюдаемые эффекты неперемешивания сливающихся рек на протяжении не только десятков, но и сотен километров [14–17]. Следовательно, имеющиеся

многочисленные оценки параметризации коэффициентов поперечной диффузии могут использоваться только в качестве начальных предварительных оценок. Поэтому, на наш взгляд, фиксируемая неустойчивость измерений расходов воды данным химическим методом, по-видимому, связана с корректностью установления створа полного перемешивания вне зависимости от схемы измерений.

Постановка задачи

Согласно многочисленным натурным исследованиям в горных потоках [12, 13], в простейшем случае, колебания концентраций показателей качества воды в водотоке описываются нормальным распределением, поэтому колебания концентрации маркера, вводимого в водоток при использовании метода смешения, удобно записать в виде:

$$C(t) = \overline{C_0}\left(1 + Cv \cdot \varepsilon_{N(0,1)}(t)\right), \qquad (8)$$

где ε(t) – случайный процесс, имеющий нормальное распределение с параметрами (0, 1).

Средние значения измеряемых расходов воды согласно (8) при постоянном $Q_n(t)$ и залповом $Q_з(t)$ введении маркера в водоток определяются:

$$Q_n(t) = \frac{G_1}{\overline{C_0}\left(1 + Cv \cdot \varepsilon_{N(0,1)}(t)\right)}, \qquad (9)$$

$$Q_з(t) = \frac{G_2}{n \cdot \Delta T \cdot \overline{C_0} \cdot \left(1 + Cv \cdot \varepsilon_{N(0,1)}(t)\right)}, \qquad (10)$$

где G_1, G_2 – интенсивность поступления концентрации маркера, соответственно, при постоянном и залповом сбросах.

При этом возникает проблема установления оптимального количества замеров. С одной стороны, казалось бы, чем чаще проводить замеры, чем меньше будет промежуток времени между отдельными замерами, тем с большей надежностью может обеспечиваться соблюдение балансовых соотношений (9), (10), с другой стороны, каждое измерение производится с определенной погрешностью замеров. В оценке погрешности измерения по схемам постоянного ввода маркера и мгновенного сброса имеется принципиальная разница. При первой схеме измерения возможно обеспечить проведение независимых, многочисленных измерений с погрешностью метода $\sigma_S \sim \frac{\sigma_{из}}{\sqrt{N}}$. В то же время при второй схеме происходит суммация, при интегральной оценке погрешность расчетов при их нормальном распределении должна возрастать как $\sigma_S \sim \sigma_{из}\sqrt{N}$, где N – общее количество замеров. Минимальное количество замеров, которое в принципе возможно при данной схеме проведения замеров – три. Первый замер в момент времени t_1 проводится при $C_1 \geq 0$, второй замер в момент времени t_2 при max C_2, третий замер в момент времени t_3 при $C_3 \geq 0$, однако проблема в том, как угадать, как определить эти моменты времени? В условиях недостаточности гидрологической информации проводить такие оценки совершенно невозможно.

Если расчетные значения расходов воды линейно связаны с концентрацией маркера, описываемой нормальным распределением, то среднеквадратическая погрешность определения расхода воды при постоянном сбросе определяется как $\sigma_n = \sigma_{nc}/\sqrt{N}$, а при залповом сбросе как $\sigma_з = \sigma_{зс}\sqrt{N_з}/\sqrt{N}$, где N, $N_з$ – количество замеров концентрации маркера, соответственно, при выполнении параллельно проведенных замеров и одной серии параллельных измерений; σ_{nc}, $\sigma_{зс}$ – среднеквадратическая погрешность измерений концентрации маркера, соответственно, при постоянном, залповом сбросах.

Решение задачи и анализ полученных результатов

Для оценки среднеквадратической погрешности измерения расходов воды на основе соотношений (8)–(10) выполнено моделирование по схеме Монте-Карло при объеме выборки $N \sim 10^5$ при различных коэффициентах вариации концентрации маркера Cv_C (таблица 1).

Как следует из Табл. 1, если коэффициенты вариации концентрации маркера Cv_C меньше 0,2, то используемый химический метод является устойчивым для измерения расходов воды как для постоянного, так и залпового сбросов.

Вне зависимости от применения конкретной схемы измерения с постоянным или

мгновенным введением маркеров в водоток основными факторами формирования погрешностей измерения являются:

1. абсолютные и соответствующие им относительные погрешности измерения концентрации маркера в воде водного объекта σ_i, мг/л;

2. погрешности, связанные с равномерным распределением маркера по поперечному сечению водотока;

3. погрешность обеспечения равномерного введения маркера в водоток;

4. погрешность, связанная с конечной скоростью введения маркера в водоток.

Таблица 1. Результаты оценки среднеквадратических погрешностей измеренных расходов при различных коэффициентах вариации концентрации маркера, полученных в ходе численного моделирования

Table 1. Results of Assessing Root-Mean-Square Errors of Measured Discharge at Various Coefficients of Variation of Tracer Concentration Obtained from Numerical Modeling

Коэффициент вариации концентрации маркера, Cv_C	Относительная среднеквадратическая погрешность измерения расходов воды	
	при постоянном сбросе, $\sigma_п$	при залповом сбросе, $\sigma_з$
0,10	0,11	0,33
0,15	0,17	0,53
0,20	0,23	0,78
0,25	0,36	1,30
0,30	0,54	5,79
0,90	29,2	714

Если первый и второй факторы являются определяющими при обоих способах измерений, то третий фактор является определяющим для способа измерения с постоянным вводом в водоток маркера, а четвертый играет существенную роль при залповом введении маркера.

Для обеспечения оперативности проведения измерений используются не прямые, химические методы, а косвенные, основанные на оценке физических свойств воды в первую очередь удельной электропроводности воды или ее оптической плотности.

Современные методы измерений обеспечивают погрешность измерения ~ 1 %, однако при этом возникает проблема установления и обеспечения надежности, устойчивости связи между самим маркером и несвязанными с его содержанием изменениями физических свойств воды, при этом принципиально важно, чтобы эта связь была надежной и устойчивой в очень широком диапазоне измерений концентраций.

При проведении измерений происходит пространственно-временное осреднение измеряемого показателя в масштабе $L_{из} \cdot T_{из}$. Если определение концентрации связано с отбором проб воды, то $L_{из}$ следует рассматривать как характерные размеры пробоотборника, а $T_{из}$ – продолжительность забора пробы воды. Если используются системы косвенных измерений, то l_d – характерные размеры самого датчика (его рабочего органа), $T_{из}$ – время измерения.

Из-за вихревой структуры турбулентности измеряемые показатели являются в общем случае случайной величиной. При этом возникает принципиальная задача: найти, выявить, оценить допустимый уровень различия, связанный со структурой турбулентности в неравномерности распределения показателей по сечению потока.

Для обеспечения однородности, т.е. максимального снижения колебаний показателей приборов контроля необходимо, чтобы ключевую роль в перемешивании играли вихри с характерными размерами l меньше размеров датчика l_d. В этом случае в силу центральной предельной теоремы интенсивность пульсаций будет стремиться к нулю $\sigma^2 \rightarrow 0$ при $l \rightarrow 0$, при этом характерный период пульсаций T будет

определяться как $T \sim l / V_*$, где V_* – динамическая скорость [18].

Нетрудно видеть, если рассматриваемый линейный размер вихрей l меньше размера датчика l_d, то в этом случае эффективный коэффициент диффузии $K_{\text{турб}}$ для такого размера вихрей должен быть $K_{\text{турб}} \sim V_* \; l_d$. Так как ширина зоны перемешивания при диффузном режиме $L \sim (K_{\text{турб}} \; t)^{1/2}$, t – время «добегания» от источника поступления маркера в водоток до контрольного створа, где производятся измерения. Максимальная ширина зоны смешения L для обеспечения полного перемешивания должна быть не меньше ширины потока B, т. е. $L \sim B$, соответственно, имеем

$$L \sim \frac{B^2 V}{K_{\text{турб}}} \sim \frac{B^2 V}{V_* l_d}, \qquad (11)$$

так как $\frac{V}{V_*} \sim \frac{C}{\sqrt{g}}$, то $L \sim \frac{B^2 C}{\sqrt{g}\, l_d}$, где C – коэффициент Шези, V – средняя характерная скорость потока на рассматриваемом участке.

При использовании гирлянды из датчиков N_d максимальная ширина зоны смешения L для обеспечения полного перемешивания определяется как:

$$L \sim \frac{B^2 C}{\sqrt{g}\, l_d \sqrt{N_d}}. \qquad (12)$$

Линейные размеры зоны распространения маркера в диффузионном приближении характеризуются следующими параметрами по глубине потока $L_H = (K_{zz} \cdot t)^{1/2}$, по ширине потока $L_B = (K_{yy} \cdot t)^{1/2}$, вдоль потока $L_X = V\, t + (K_{xx} \cdot t)^{1/2}$, где K_{zz}, K_{yy}, K_{xx} – коэффициенты диффузии по глубине, ширине потока и продольной диффузии, соответственно. Принимая, что $t \sim L_X / V$, где L_X – расстояние от источника поступления маркера в поток до контрольного створа, нетрудно оценить расстояние до створа эффективного перемешивания по глубине потока

$$L_{XH} >> H^2 \cdot V / K_{zz}, \qquad (13)$$

соответственно, по ширине потока

$$L_{XB} >> B^2 \cdot V / K_{yy}. \qquad (14)$$

Согласно большинству прикладных моделей турбулентности в русловых потоках

$$K_{zz} \sim P_{zz} \cdot V \cdot H, \qquad (15)$$

$$K_{yy} \sim P_{yy} \cdot V \cdot H, \qquad (16)$$

Подставляя (15), (16) в (13) и (14), соответственно, будем иметь

$$L_{XH} >> \text{H} / P_{zz},, \qquad (17)$$

$$L_{XB} >> B / P_{yy}, \qquad (18)$$

контрольный створ соответственно должен располагаться на расстоянии $L_{\text{конт}} \geq L_{XB} \geq L_{HB}$. При этом начало измерения концентрации маркера должно проводиться не раньше, чем $T >> (K_{xx} \; L_X/V)^{1/2}/V$ от начала пуска маркера.

Данная схема измерения расходов воды основана на использовании минимального объема априорной информации о гидродинамике потока и соблюдении неравенств (13), (14), однако она требует наличия соответствующего оборудования по обеспечению длительного, равномерного поступления маркера в водоток.

В то же время горные реки, для которых рассматриваемый метод может представлять наибольший интерес, характеризуются весьма быстрым прохождением паводка, значительной изменчивостью расходов воды. Поэтому на наш взгляд, фиксируемая неустойчивость измерений расходов воды данным химическим методом, по-видимому, в первую очередь связана с корректностью установления створа полного перемешивания вне зависимости от схемы измерений.

Как следует из многочисленных экспериментальных оценок, коэффициент поперечной дисперсии в 3–3,5 раза больше, чем коэффициент вертикальной дисперсии. Поэтому в широких руслах при отношении $B/H >$ 20 лимитирующим фактором, определяющим расстояние до створа полного перемешивания, будет поперечная дисперсия.

Принципиально другая ситуация может наблюдаться в водотоке со значительной вертикальной стратификацией водных масс. Однако для таких объектов измерение расходов воды методом разбавления, химическим методом не производится.

Когда из элементарных оценок интенсивности диффузионного перемешивания следует, что $L \sim (K_{zz} \cdot t)^{1/2}$ или $B \sim (K_{zz} \cdot L/V)^{1/2}$ отсюда

$$L \sim B^2 \cdot V/K_{zz}. \quad (19)$$

При этом величина коэффициента поперечной диффузии, согласно многочисленным эмпирическим и полуэмпирическим оценкам, имеет вид

$$K_{zz} \sim P_{zz}\, H\, V\sqrt{g}/C. \quad (20)$$

При этом величина коэффициента P_{zz} зависит как от соотношения $\sqrt{g}/C$, так и морфометрического показателя B/H. Согласно большинству оценок при $B/H \sim 20$ $P_{zz} \sim 0.25$ [19]. При $B/H \sim 100$ диапазон возможных колебаний данного параметра существенно увеличивается и составляет $P_{zz} \sim 0.2\text{-}3.1$. Подставляя (20) в (19) для оценки расстояния до створа полного перемешивания имеем $L_{Kzz} \sim B^2/(H\, P_{zz} \cdot \sqrt{g}/C)$. При $\sqrt{g}/C \sim 0.1$, $B/H \sim 20$, $H \sim 1$ имеем $L_{Kzz} \sim B^2/(1 \cdot 0.25 \cdot 0.1) \sim 40 \cdot B^2$.

Согласно известному соотношению Римана расстояние до створа полного перемешивания $L_{Рим} \sim 0.13 \cdot B^2 \cdot C \cdot (0.7 \cdot C + 2 \cdot \sqrt{g})$. При $C \sim 30$ имеем $L_{Рим} \sim B^2 \cdot 0.13 \cdot 30 \cdot (0.7 \cdot 30 + 6) = 105 \cdot B^2$. В то же время при $C \sim 20$ различие этих оценок будет значительно меньше $L_{Kzz} \sim 60 \cdot B^2$, $L_{Рим} \sim B^2 \cdot 0.13 \cdot 20 \cdot (14+6) = 52 \cdot B^2$. Таким образом для относительно небольших рек характерное расстояние до створа полного перемешивания должно гарантировано составлять $L \sim 50 \cdot B^2$, т.е. при $B \sim 10$ м, $L \sim 5000$ м, а при $B \sim 5$ м, соответственно, $L \sim 1250$ м.

Дополнительным источником формирования погрешности расчетов при постоянном введении маркеров в водоток является проведение измерений при невыполнении неравенства $T >> (K_{xx}\, L_X/V)^{1/2}/V$. Поэтому необходимо выполнение основных требований к выбору вещества, используемого в качестве маркера:

- оно не должно быть токсичным даже в малых концентрациях;

- должны существовать, быть доступными методы измерения, позволяющие определять малые концентрации с погрешностями приемлемыми для измерения расходов;

- вещество должно быть консервативно, по крайней мере его коэффициент неконсервативности k должен обеспечивать выполнение следующего неравенства $k * \frac{L}{V} \ll \acute{\varepsilon}$, где $\acute{\varepsilon}$ – приемлемая погрешность измерения расходов воды, а также гидродинамически пассивная, т.е. не оказывающая какого-либо влияния на гидродинамику потока.

Выводы

Состоятельность статистических оценок измерения расходов воды в водотоках химическим методом обусловлена структурой расчетных соотношений. Соотношение по оценке расходов воды содержит в знаменателе значения концентрации маркера, представляющие собой, в общем случае, случайную величину. Если ее изменчивость определяется только погрешностями измерений и мелкомасштабными турбулентными пульсациями, то колебания концентрации маркера будут описываться нормальным распределением, а расчетная величина расходов воды должна описываться обратным нормальным распределением. Характерной особенностью данного распределения является то, что оценки средних значений и дисперсий несостоятельны. Впервые показано, что при низкой изменчивости концентрации маркера $C(t)$ оценки $Q(t)$ состоятельны. Эффективным способом повышения устойчивости измерений расходов воды являются использованием гирлянды из датчиков N_d при максимальной ширине зоны смешения $L \sim \frac{B^2 C}{\sqrt{g}\, l_d \sqrt{N_d}}$ и увеличение расстояния от начального до контрольного створов.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках гос. задания №124020500053-6.

Acknowledgements

The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment No. 124020500053-6.

Литература / References

1. Wood P.J., Dykes A.P. The use of salt dilution gauging techniques: ecological considerations and insights. Water Research, 2002, vol. 36, pp. 3054–3062.
2. Acosta-Motos J.R., Ortuño M.F., Vicente A. B., Diaz-Vivancos P., Sanchez-Blanco M. J., Hernandez J. A. Plant Responses to Salt Stress: Adaptive Mechanisms. Agronomy, 2017. vol. 7 (18). 38 p.
3. Pang H., Xin X., He J., Cui B., Guo D., Liu S., Yan Z., Liu C., Wang X., Nan J. Effect of NaCl Concentration on Microbiological Properties in NaCl Assistant Anaerobic Fermentation: Hydrolase Activity and Microbial Community Distribution. Frontiers in Microbiology, 2020, vol. 11, pp. 1–10.
4. Бернадский Н.М. Измерение расходов воды химическим методом. СПб. 1913.
5. Риммар Г.М. Применение электропроводности для определения расходов воды методом смешения // Труды ГГИ, в. 36 (90): ГИМИЗ, 1952. С.18–48.
6. Schloeseng M. Th. Nouvelle methode pour juger les fluids. Comples rendus du deuxieme semester de l'Acadamie des Sciences. Paris, 1863.
7. Юхно А.В., Бузмаков С.В., Лубенцов А.С., Пнюшков А.Д. Измерение малых расходов воды методом постоянного пуска соляного раствора // Сб.: Рос. форум изыск. Сб. докл. IV Межд. научно-практ. конф. М. 2022. С. 159–171.
8. Юхно А.В., Бузмаков С.В., Кулешов А.В. О развитии метода ионного паводка для определения расхода воды // Сб. тр. конф. «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития» им. Л. Н. Карлина, С.-П. / MGO-2022. М.: Изд-во «Перо». – 2022. – С. 257–260.
9. Юхно А.В., Бузмаков С.В., Лубенцов А.С. Метод ионного паводка как инструмент гидрологического мониторинга в горных районах. Специфика и перспективы // Водные ресурсы в условиях глобальных вызовов: экологические проблемы, управление, мониторинг. Ростов-на-Дону. Из-во: ООО «Лик» (Новочеркасск). 2023. С. 176–181.
10. Johnson N.L., Kotz S., Balakrishnan N. Continuous Univariate Distributions. Wiley. 1994. Vol. 1. 171 p.
11. Springer M.D. The Algebra of Random Variables. Wiley. 1979. 492 p.
12. Sappa G., Ferranti F., Pecchia G. M. Validation of Salt Dilution Method for Discharge Measurements in the Upper Valley of Aniene River (Central Italy). Recent Advances in Environmental, Ecosystem and Development, 2015, pp. 42–48.
13. Merz J., Doppmann G. Measuring Mountain Stream Discharge Using the Salt Dilution Method: A Practical Guide. Kathmandu, Nepal: International Centre for Integrated Mountain Development (ICIMOD), 2006, pp. 1–14.
14. Lane S.N., Parsons D.R., Best J.L., Orfeo O., Kostaschuk R.A., Hardy R.J. Causes of rapid mixing at a junction of two large rivers: Rio Parana and Rio Paraguay, Argentina. JGR: Earth Surface, 2008, vol. 113, F02024. DOI:10.1029/2006JF000745.
15. Любимова Т.П., Лепихин А.П., Паршакова Я.Н., Колчанов В.Ю., Gualtieri C., Lane S.N., Roux B. Гидродинамические аспекты слияния рек с различными плотностями вод // Вычислительная механика сплошных сред. 2020. Т. 13. № 4. С. 381–392.
16. Bouchez J., Lajeunesse E., Gaillardet J., France-Lanord C., Dutra-Maia P., Maurice L. Turbulent mixing in the Amazon River: The isotopic memory of confluences. Earth Planet. Sci. Lett., 2010, vol. 290, pp. 37–43. DOI:10.1016/j.epsl.2009.11.054.
17. Mackay J.R. Lateral mixing of the Liard and Mackenzie rivers downstream from their confluence // Canadian Journal of Earth Sciences, 1970, vol. 7., pp. 111–124. DOI:10.1139/e70-008.
18. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. М.: Наука, 1965. Ч. 1. 639 с.

19. Математическое моделирование в управлении водопользованием (под ред. А.М. Черняева). Екатеринбург: Аква-Пресс, 2001. 520 с.

Поступила в редакцию / Received 23.11.2025
Принята к публикации / Accepted 11.12.2025

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Синцова Татьяна Николаевна, ведущий инженер, Горный институт УрО РАН, г. Пермь, Россия, SPIN-код: 7569-1702, https://orcid.org/0000-0003-0327-4894, Author ID Scopus: 57474212500, Author ID: 1226076, e-mail: tanya_sinzova@mail.ru.

Лепихин Анатолий Павлович, доктор географических наук, заведующий лабораторией, Горный институт УрО РАН, г. Пермь, Россия, SPIN-код: 7621-8001, https://orcid.org/0000-0001-9874-3424, Author ID: 147950, Author ID Scopus: 56370650100, e-mail: lepihin49@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tatyana N. Sintsova, leading engineer, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia, SPIN-code: 7569-1702, https://orcid.org/0000-0003-0327-4894, Author ID Scopus: 57474212500, Author ID: 1226076, e-mail: tanya_sinzova@mail.ru.

Anatoly P. Lepikhin, D.Sc. (Geography), Head of the Laboratory, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia, SPIN-code: 7621-8001, https://orcid.org/0000-0001-9874-3424, Author ID: 147950, Author ID Scopus: 56370650100, e-mail: lepihin49@mail.ru.

НАУЧНЫЕ ДИСКУССИИ
SCIENTIFIC DISCUSSIONS

Предисловие от редакции к статье А.А. Возняк. К вопросу корректировки нормативных документов по определению основных гидрологических характеристик

Проблема неадекватности действующих в России нормативов по определению гидрологических характеристик для строительного проектирования назрела и перезрела так давно, что она (неадекватность) уже закрепилась в сознании профессионального сообщества как особый «извращенный» вариант нормы, который терпеть невыносимо, а изменить неподъемно. Из ученых, работающих над научным обоснованием методов инженерной гидрологии в период с конца 1990-х годов, трудно назвать таких, кто не отмечал бы неадекватность действующих нормативов как в части учета региональных особенностей гидрологического режима, так и в части усвоения современного уровня знаний, методов, технического и информационного обеспечения гидрологии.

При этом, основной методический документ по определению основных гидрологических характеристик, приобретший свою «каноническую» форму в виде СНиП 2.01.14-83, пережил затем ряд переработок и сейчас существует в форме СП 529.1325800.2023, лишь в самой незначительной степени изменив свое содержание – добавились, в основном, некоторые рекомендации по оценке однородности рядов наблюдений и построению составных кривых обеспеченности для неоднородных рядов. Концептуальная база документа, сформированная в 70-х годах прошлого столетия, не изменилась.

Предлагаемая вниманию читателей статья представляет собой редкий пример методического взгляда на проблему со стороны специалиста-практика, занимающегося разработкой правил использования водохранилищ на малых и средних реках Урала. Статья представляет большую ценность попыткой систематизации недостатков нормативного документа в плане именно его практического применения. Такой характер работы обуславливает и некоторую ограниченность анализа проблемы в статье. Не задет целый ряд фундаментальных, технических и организационных проблем, среди которых автору этих строк представляется ключевыми следующие: уже происшедший отказ от гипотезы эргодичности; архаичность представления нормативов в виде текста на бумаге, в то время как современной формой должно быть пользовательское приложение в сопровождении необходимых баз данных; обеспечение доступа профессиональному сообществу к данным государственной сети наблюдений, которые сейчас хранятся, фактически, в режиме коммерческой секретности.

В целом, как представляется, появление такой работы, изначально представленной в виде доклада на VI международной научно-практической конференции «Виноградовские чтения: Гидрология нового поколения», является удобным поводом для редакции журнала возобновить публикации работ в порядке научной дискуссии, положительный опыт которой уже был получен в 2023 году. Тематика совершенствования нормативной базы, очевидно, является наиболее болезненной профессиональной проблемой, и, хотя и не может быть решена читателями нашего журнала, но настоятельно требует широкого и разностороннего обсуждения для выработки определенного мнения профессионального сообщества. С учетом сказанного, редакция приглашает всех коллег принять участие в интересной и общественного-полезной работе.

Научная статья / Scientific paper
УДК: 556.535.3
DOI: 10.34753/HS.2025.7.3.297

К вопросу корректировки нормативных документов по определению основных гидрологических характеристик

А.А. Возняк
Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов, Камский филиал, г. Пермь, Россия; Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия; Горный институт УрО РАН, г. Пермь, Россия
e-mail: aavoznyak@gmail.com

Аннотация. Решение практических задач в самых различных отраслях народного хозяйства от строительного проектирования до мелиорации и водообеспечения не может быть реализовано без изысканий и гидрологических расчетов. На основе проведенных расчетов основных гидрологических характеристик при разработке Правил использования водохранилищ на малых и средних уральских реках рассмотрены проблемы, возникающие при использовании в расчетах методов, рекомендованных действующими нормативными документами. Предложены решения методологических проблем через корректировку отдельных пунктов СП 529.1325800.2023. Они касаются временной неоднородности гидрологических рядов, отсутствия необходимых формул и внесения дополнительных поправок к имеющимся, некорректных условий регрессионного анализа и добавления в раздел 7 СП 529.1325800.2023 метода восстановления рядов при отсутствии данных наблюдений. Другая часть проблем, связанная с существенной пространственной неоднородностью территории по физико-географическим показателям, представлена в дискуссионном режиме. Она касается корректности гидрологических расчетов на речных водосборах от Урала до Дальнего Востока и определяется трудностями поиска рек-аналогов с синхронным гидрологическим режимом и сложностью выделения однородных районов.

Ключевые слова: гидрологические расчеты; СП 529.1325800.2023; корректность методов расчета; расчет максимального расхода паводка; реки-аналоги.
Для цитирования: Возняк А.А. К вопросу корректировки нормативных документов по определению основных гидрологических характеристик // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2025. Т. 7. Вып. 3. С. 297–303. DOI: 10.34753/HS.2025.7.3.297.

On the Issue of Adjusting Regulatory Documents for Determining the Main Hydrological Characteristics

Anna A. Wozniak
Russian Research Institute for the Integrated Use and Protection of Water Resources, Kama Branch, Perm, Russia; Perm State University, Perm, Russia; Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia
e-mail: aavoznyak@gmail.com

Abstract. Solving practical problems in a wide variety of sectors of the national economy, from construction design to land reclamation and water supply, are impossible without surveys and hydrological calculations. Based on calculations of the main hydrological characteristics conducted during the development of the Rules for the Use of Reservoirs on Small and Medium-Sized Ural Rivers, problems arising from the use of calculation methods recommended by current regulatory documents are considered. Solutions to methodological issues are proposed through adjustments to individual clauses of SP 529.1325800.2023. These relate to the temporal heterogeneity of hydrological series, the absence of necessary formulas and the introduction of additional amendments to existing ones, incorrect conditions for regression analysis, and the addition of a method for reconstructing series in the absence of observational data to Section 7 of SP 529.1325800.2023. Other issues related to the significant spatial heterogeneity of the territory in terms of physical and geographical indicators are presented for discussion. They concern the correctness of hydrological calculations in river catchments from the Urals to the Far East and are

determined by the difficulties of finding analogue rivers with a synchronous hydrological regime and the complexity of identifying homogeneous regions.

Keywords: hydrological calculations; SP 529.1325800.2023; correctness of calculation methods; calculation of maximum flood flow; analogue rivers.

For citation: Wozniak A.A. On the issue of adjusting regulatory documents for determining the main hydrological characteristics. Hydrosphere. Hazard processes and phenomena, 2025, vol. 7, iss. 3, pp. 297–303. DOI: 10.34753/HS. 2025.7.3.297. (In Russian; abstract in English).

Введение

Гидрологические расчеты – раздел гидрологии, который наряду с гидрологическими прогнозами является основным в области гидрологических наук. Решение практических задач в самых различных отраслях народного хозяйства: от строительного проектирования до мелиорации и водообеспечения – не может быть реализовано без изысканий и гидрологических расчетов. Даже если строительство осуществляется вдали от водных объектов, всегда территория строительства является водосборной площадью какого-либо водного объекта. Игнорирование этого факта и не проведение гидрологических изысканий и расчетов приводит к очень большим проблемам: заболачиванию территории или, наоборот, образованию пустынных областей. Поэтому в любой развитой цивилизации, начиная с древнеримских акведуков, гидрологические расчеты обязательно проводились.

В России гидрологические расчеты начали развиваться с конца XIX века. С появлением государственной собственности и планового хозяйства процесс изысканий был взят под государственный контроль, и гидрологические расчеты были систематизированы, то есть сведены к единым общегосударственным правилам. В 1960-х гг. в соответствии с решениями III Всесоюзного гидрологического съезда были выполнены большие работы по обобщению отечественного и зарубежного опыта инженерно-гидрологических расчетов и создан ряд первых нормативных документов для Госстроя СССР по определению минимального (строительные нормы: СН 346-66) и максимального стока талых вод (СН 356-66), годового стока и его внутригодового распределения (СН 371-67) и наивысших уровней воды рек и озер (СН 397-69). В 1972 г. издан единый нормативный документ «Указания по определению расчетных гидрологических характеристик СН 435-72». На базе этого документа в 1985 г. был издан общесоюзный стандарт СНиП 2.01.14-83. К последнему документу в помощь разработчикам было издано Пособие по определению расчетных гидрологических характеристик [1] с набором более трех десятков карт, на которых представлены в изолиниях по всей территории СССР и расчетные гидрологические характеристики, и параметры формул и распределений, и границы однородных районов.

В 2005 г. вышел новый нормативный документ – Свод правил по проектированию и строительству «Определение основных расчетных гидрологических характеристик» СП 33-101-2003[1], однако он был без карт, и большинство разработчиков по-прежнему активно использовали Пособие [1]. С 2007 по 2011 гг. ГГИ разработали Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при наличии, недостаточности и отсутствии данных гидрометрических наблюдений [2–4] взамен Пособия [1]. И, наконец, 12 октября 2023 г. введен в действие новый, утвержденный приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 11 сентября 2023 г. Свод правил (далее – СП) СП 529.1325800.2023 Определение основных расчетных гидрологических характеристик[2].

[1] СП 33-101-2003 Определение основных расчетных гидрологических характеристик (одобрен Постановлением Госстроя РФ от 26.12.2003 № 218). – М.: ФГУП ЦПП, 2004. – 85 с.

[2] СП 529.1325800.2023. Определение основных расчетных гидрологических характеристик (утв. Приказом Минстроя России от 11.09.2023 № 654/пр). М., 2023. 103 с.

Обозначение проблемы

Камский филиал РосНИИВХ в 2011–2013 гг. разрабатывал, а в 2020–2022 гг. актуализировал Правила использования водохранилищ (далее – ПИВ) для десяти водохранилищ Уральского региона, расположенных на малых и средних реках. Естественно, необходимо было провести гидрологические расчеты. В гидрологические расчеты входит определение основных гидрологических характеристик: годовой сток, внутригодовое распределение, максимальные и минимальные расходы и уровни воды заданной вероятности превышения. Для обеспечения дальнейшего согласования и принятия проектных документов, все эти расчеты должны быть произведены в строгом соответствии с нормативными документами по определению основных расчетных гидрологических характеристик.

И вот тут возникла проблема. Произвести корректные расчеты основных гидрологических характеристик для уральских рек по представленным в нормативных документах методам не представляется возможным, а введение новых способов расчета, новых физико-географических факторов, уточнений формул не утверждается согласующими организациями. Вывод: изменять, совершенствовать, корректировать нормативные документы. Далее обозначим ряд корректировок, использованных для завершения разработки ПИВ на малых реках Уральского региона. Заметим, что наши предложения по корректировке ограничены расчетами на уральских реках. Предлагаем подключиться к дискуссии гидрологов Сибири и Дальнего Востока.

Еще необходимо отметить, что номера пунктов, требующих корректировки, даны по последнему документу СП 529.1325800.2023, хотя и в двух предыдущих СП данные пункты излагались точно в такой же формулировке, изменилась только нумерация.

Пункты корректировки нормативных документов

1. Первая проблема – пространственная неоднородность большинства речных бассейнов от Урала до Тихоокеанского побережья. Она приводит к невозможности подобрать корректные реки–аналоги для малых и средних уральских рек в силу природных особенностей Уральских гор. Это, в принципе, основная и самая главная проблема всех гидрологических расчетов на Урале, поскольку, согласно всем СП, и старым, и новым[1,2] [1–4], и при недостаточности данных гидрометрических наблюдений, и при отсутствии данных гидрометрических наблюдений, расчеты всех характеристик производятся с использованием данных рек-аналогов (или рек однородного района).

Эта проблема не является недостатком или ошибкой разработчиков СП. Как уже отмечалось, во все СП[1,2] [1–4] вошли обобщенные формулы, выведенные исследователями в первой половине XX века (и вот уже более 60 лет они не меняются) по данным наблюдений на реках Северо-Западного, Центрального регионов и Днепровского бассейна. Гидрологические расчеты возникли, в принципе, для обеспечения безопасности строительства первых ГЭС – Днепрогэса и Волховстроя. Первые гидрометеорологические высшие учебные заведения в СССР возникли в Одессе, Москве и Ленинграде. Головное учреждение по гидрологии (ГГИ) тоже было в Ленинграде. Все ученые, занимающиеся гидрологическими исследованиями, были сосредоточены в Ленинграде, Москве, Одессе, Киеве. Таким образом, все методы расчетов разработаны по данным рек Восточно-Европейской равнины.

Для всех речных бассейнов Урала и, далее, Сибири и Дальнего Востока характерна очень существенная пространственная неоднородность и факторов подстилающей поверхности, и климатических факторов. Поэтому условия выбора рек-аналогов, перечисленные в п. 4.9 СП 529.1325800.2023, не являются достаточными для проведения корректных расчетов. Например, две соседние малые реки с одинаковыми площадями водосбора (287 км^2 – Куса-Магнитка и 277 км^2 – Большая Арша – Вознесенская, бассейн р. Ай, бассейн р. Уфы), протекающие в одном направлении, имеют асинхронность в максимальных расходах не только дождевых паводков, но и весеннего половодья. При этом, как было отмечено, условия выбора рек-аналогов

из[1,2] [1–4] полностью выполняются. И таких примеров – десятки, по рекам-аналогам всех десяти разрабатываемых проектов ПИВ.

Предложения по решению этой проблемы – при расчетах на неизученных реках для получения более-менее корректных результатов прибегать к построению районных зависимостей характеристик стока от физико-географических факторов для однородного района. Но и здесь есть свои проблемы: даже внутри одного речного бассейна средних размеров (до 30000 км^2) часто нет одной четко выраженной зависимости, приходится разделять посты одного водосбора на 5–6 более-менее однородных группировок со своими зависимостями, и встает вопрос – а к какой из групп отнести наш неизученный водосбор?

Выход – использование таких физико-географических факторов для построения районных зависимостей, которые дают однозначные, четко выраженные линии связи характеристик стока, даже если эти факторы не входят в перечень, приведенный в нормативных документах. Этот вопрос будет рассмотрен отдельно ниже по тексту.

2. Вторая проблема касается уже временной неоднородности гидрологических рядов. И она актуальна уже не только для Уральского региона или Сибири. На речных бассейнах рек Восточно-Европейской равнины также почти все гидрологические ряды неоднородны.

И это тоже не ошибка разработчиков первых СП. Когда разрабатывались первые Правила, ряды наблюдений имели продолжительность от 7 до 30 лет. А в настоящее время средняя продолжительность рядов наблюдений 70–80 лет (есть до 120 и более). Когда этот ряд делится на 2 группы по 30–40 лет, они тоже являются однородными. Но по коротким рядам некорректно определять расходы 0,1 или 0,01 % вероятности превышения. В принципе, еще в СП-33-101[1] использовались составные кривые, а в новом СП 529[2] добавлен еще один метод решения проблемы временной неоднородности через использование Байесовского подхода. Но почему-то так и не исчезла фраза «Определение расчетных гидрологических характеристик следует проводить по однородным рядам наблюдений» – первое предложение п. 4.6 СП 529. Все ряды не однородны, все гидрологи давно считают по неоднородным рядам, используя составные кривые распределения. Однако согласующие организации «заворачивают» проект, так как в Пояснительной записке приведена проверка на однородность, ряды не однородны, следовательно, в соответствии с 1-ым предложением п. 4.6 СП 529, расчеты не корректны.

Решение проблемы: убрать первое предложение п. 4.6 СП 529, заменить его на «Все ряды наблюдений должны быть проверены на однородность. В случае неоднородности ряда, использовать составные кривые распределения или Байесовский подход».

3. Проблема: Некорректность условий (6.1) из п. 6.1.6 СП 529, соблюдение которых необходимо при восстановлении ряда с использованием регрессионного анализа.

Выполнение всех 4 условий (6.1) из п. 6.1.6 СП 529 возможно только при использовании одного аналога, при двух предикторах минимальная длина совместного ряда наблюдений должна составлять 25–30 лет, при трех – более 40 и т.д. [5–6], иначе условие $k/\sigma_k \geq 2$ не может быть соблюдено. А, как уже отмечалось, несоблюдение условий приводит к несогласованию документа.

Решение проблемы – корректировка условий (6.1) из п. 6.1.6 СП 529.

4. В принципе, 4-ая проблема возникла при расчете условий (6.1) из п. 6.1.6 СП 529, однако она касается и других пунктов данного СП, поэтому ее выделили отдельно, как самостоятельную проблему.

Она заключается в том, что отсутствуют формулы по определению параметров из условий (6.1) из п. 6.1.6 СП 529. П. 6.1.4 СП 529 гласит: «При восстановлении значений стока за отдельные годы и расчете параметров и квантилей распределения необходимо проводить статистическую оценку значимости и устойчивости получаемых решений с определением случайных и систематических погрешностей в соответствии с п. 6.1.6», в котором как раз и приводятся условия (6.1). Но формул по расчету средних квадратических погрешностей

коэффициента корреляции и коэффициента регрессии в СП 529[2] не приводится, нет их и в Методических рекомендациях по определению расчетных гидрологических характеристик при отсутствии данных гидрометрических наблюдений, выпущенных ГГИ в 2009 г. [3]. Инженеры, разработчики проектов, изыскатели не владеют этой информацией. Нормативные документы по гидрологическим расчетам должны содержать в своем тексте формулы определения всех характеристик, так или иначе используемых в методах расчета, или ссылки на источники, где эти формулы можно найти.

5. Пятая проблема также касается восстановления ряда. Дело в том, что при разработке ПИВ необходимо восстановить погодичные значения среднегодовых расходов за 70–80 лет, даже если на данном водном объекте никогда не проводились гидрометрические наблюдения. Так вот, ни в одном из нормативных документов, давних, средней давности и новых, не предлагается ни одного метода по восстановлению ряда при полном отсутствии данных наблюдений. Пришлось самостоятельно разрабатывать подобные методы, апробировать их и выбирать лучший.

Решение проблемы – добавить в раздел 7 СП 529, где рассматриваются методы определения расчетных гидрологических характеристик при отсутствии данных гидрометрических наблюдений, метод восстановления погодичных значений стока при отсутствии данных наблюдений.

6. Шестая проблема касается как раз набора физико-географических факторов, по которым строятся региональные зависимости характеристик стока, о которых упоминалось в изложении первой проблемы.

Как отмечалось выше, в связи с тем, что подбор аналогов для уральских рек очень затруднен, а при отсутствии наблюдений – невозможен, расчеты среднего многолетнего значения стока неисследованных рек определяют в соответствии с СП[1,2] [1, 4] по районным зависимостям стока от физико-географических факторов, установленным для изученных рек в районе исследования. Для равнинных рек – это, в первую очередь, площадь водосбора, для горных и полугорных рек – средняя высота водосбора. В Методических рекомендациях ГГИ [4] добавлены еще 14 факторов для средних рек и дополнительно 4 для малых рек. По нашему опыту в расчетах ПИВ для средних и малых уральских рек ни один из 18 факторов не показывает хорошие зависимости характеристик стока от них. Зато почти все стоковые характеристики имеют значимую зависимость (коэффициент аппроксимации 0,6–0,8) от географических координат центра тяжести водосбора. Однако в СП[1,2] [1, 3] данные физико-географические факторы не указываются, и при согласовании Росгидромет выставляет замечания о несоответствии методов расчета нормативным документам.

7. Седьмая проблема также вытекает из первой, поэтому в первой и было отмечено, что она основная и главная для рек Уральского региона. Пространственная неоднородность стоковых характеристик приводит к отсутствию однозначных зависимостей модуля максимального стока от площади водосбора даже в рамках одного речного бассейна. Отсюда возникает сложность с определением параметров формул расчета максимального стока из раздела 7 СП 529, и дождевого, и весеннего. В СНиП 2.01.14-83, вернее, в Пособии к нему, эти параметры были приведены в таблицах по природным зонам. В последних двух СП[1,2] предлагается самостоятельно строить зависимости вида $q_{1\%}=f(F)$ для нахождения параметров редукционной формулы. В Уральском регионе с этим возникли проблемы. Например, при рассмотрении всех постов наблюдений одного водосбора уральской реки средних размеров (около 30000 км^2) получаем 5 зависимостей вида $q_{1\%}=f(F)$ с параметром степени редукции от 0,15 до 0,40, однозначной связи нет. Возникает нерешаемый вопрос: какое значение параметра брать для расчетной реки, если на ней никогда не было наблюдений, и она равнозначно может быть отнесена к любой из групп с разными параметрами. А значение параметра меняет расчетный максимальный расход практически в 2 раза.

8. Из совокупного влияния первой и седьмой проблем, которое можно в общем виде

выразить как «существенная неоднородность процессов формирования стока даже внутри одного речного бассейна», вытекает восьмая проблема – расчет максимального расхода определенной вероятности превышения по редукционной формуле. О том, что редукционная формула не дает корректных расчетов для рек Сибири, писалось еще в 1980-х годах [7]. Вот и на Урале эта проблема тоже актуальна. В таблице 1 представлен расчет максимальных расходов разных обеспеченностей для р. Лысьвы в створе Лысьвенского гидроузла по редукционной формуле, представленной в СП[1,2] [1, 4] для расчетов при отсутствии данных наблюдений. Таблица 1 явно демонстрирует существенную разницу в значениях расчетных расходов, при этом все приведенные посты прошли проверку на соответствие условиям выбора аналогов.

9. Девятая проблема касается учета влияния карста на величину максимального и минимального обеспеченного расхода. СП 529.1325800.2023 предлагает вводить поправку на закарстованность только в среднемноголетний слой стока весеннего половодья. При этом вид зависимости для поправки на закарстованность не приводится, в отличие от других поправок. Однако, как показали исследования [8, 9], не менее важным является введение поправки при расчете максимального расхода по редукционной формуле, и при расчете минимального расхода, особенно зимней межени. При этом величина поправочного коэффициента зависит не столько от площади закарстованности, сколько от типа карста, распространенного на данном водосборе.

Таблица 1. Максимальные расходы весеннего половодья разных обеспеченностей для р. Лысьвы в створе Лысьвенского гидроузла, рассчитанные по редукционной формуле (7.9) СП 529.1325800.2023
Table 1. Maximum spring flood discharges of varying probability for the Lysva River at the Lysva Reservoir dam, calculated using the reduction formula (7.9) from CP 529.1325800.2023

Аналог	$Q_{0.01\%}$	$Q_{0.1\%}$	$Q_{1\%}$	$Q_{3\%}$	$Q_{5\%}$	$Q_{10\%}$
Чусовая-Кын	515	458	363	287	228	178
Чусовая-Лямино	257	251	223	191	154	145
Вогулка-Шамары	306	263	204	165	111	99
Сылва-Шамары3130	391	201	158	175	120	98
Сылва-Шамары2160	289	257	207	163	132	130
Сылва-Подкаменное	363	312	244	186	136	120
Сылва-Сылвенск	234	218	189	152	112	100
Усьва-Усьва	206	202	173	144	111	99
Серебряная	191	185	162	134	109	103
Барда-Синюшата	274	236	181	138	101	80
Бабка-Балалы	209	186	148	123	88	82

Решение проблем №№ 6–9 может состоять в предоставлении больших возможностей для региональных подходов к расчету основных гидрологических характеристик, естественно, при обязательном их научном обосновании. Главное, чтобы это было указано в нормативном документе, чтобы согласующие организации не «заворачивали» проекты, аргументируя это несоответствием методам нормативных документов.

Таким образом, при проведении расчетов основных гидрологических характеристик на уральских реках с использованием СП 529.1325800.2023 проявились некоторые недостатки предлагаемых в СП методов расчета. Первая, и с седьмой по девятую проблемы связаны, возможно, с особенностями рельефа Уральских гор, и характерны только для уральских рек, хотя, судя по вопросам при докладах на конференциях, они актуальны и для территории Сибири и Дальнего Востока. Остальные пять проблем должны возникнуть у инженера-разработчика любого региона РФ при проведении расчетов характеристик гидрологического режима любых рек, даже на территории Восточно-Европейской равнины.

Литература / References

1. Пособие по определению расчетных гидрологических характеристик. Л.: Гидрометеоиздат. 1984. 449 с.
2. Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при наличии данных гидрометрических наблюдений. СПб.: Изд-во Нестор-История, 2005. 103 с.
3. Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при недостаточности данных гидрометрических наблюдений. СПб.: Изд-во Нестор-История, 2007. 67 с.
4. Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при отсутствии данных гидрометрических наблюдений. СПб.: Изд-во Нестор-История, 2009. 193 с.
5. Возняк А.А. Расчет годового стока в соответствии с нормативными документами по определению основных гидрологических характеристик // Сборник докладов X Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участ. «Современные проблемы водохранилищ и их водосборов», г. Пермь, 29 мая – 1 июня 2025 г. С. 53–58.
6. Сикан А.В. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации. Учебник. Специальность «Гидрология» направления подготовки «Гидрометеорология». СПб.: изд. РГГМУ. 2007. 279 с.
7. Комлев А.М. Особенности формирования стока малых рек и методы его оценки // Использование, регулирование и охрана водных ресурсов малых рек. Красноярск, изд. СибНИИГИМ. 1987. С. 81–85.
8. Возняк А.А. Влияние карста на максимальный сток рек Чусовой и Сылвы // Сборник научных трудов по материалам Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Карст и пещеры. 2024», Пермь – Кунгур, 28 мая – 01 июня 2024 г. С. 25–31.
9. Возняк А.А. Гидрологический аспект влияния карста на Урале (на примере рек Чусовая и Сылва) // Материалы II Международной научно-практической конференции «Географическое пространство: сбалансированное развитие природы и общества. Челябинск, 2021. С. 51–58.

Поступила в редакцию / Received 16.09.2025
Принята к публикации / Accepted 02.10.2025

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Возняк Анна Анатольевна, кандидат географических наук, главный специалист, Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов, Камский филиал, доцент кафедры, Пермский государственный национальный исследовательский университет; старший научный сотрудник, Горный институт УрО РАН, г. Пермь, Россия, SPIN-код: 2436-8281, Author ID: 289675, Scopus ID: 57211202546, e-mail: aavoznyak@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Anna A. Wozniak, Ph.D. (Geography), Chief Specialist, Russian Research Institute for the Integrated Use and Protection of Water Resources, Kama Branch; Associate Professor, Perm State University; Senior Researcher, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia, SPIN-code: 72436-8281, Author ID: 289675, Scopus ID: 57211202546, e-mail: aavoznyak@gmail.com.

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. Экологические проблемы и опасности в гидросфере
4. Эволюция гидросферы
5. Методы, модели и технологии
6. Вопросы совершенствования нормативной документации
7. Мониторинговые, экспериментальные и экспедиционные исследования
8. Глобальные и региональные изменения природы и климата
9. Научные дискуссии
10. Наследие
11. Хроника

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. Ecological problems and hazards in the hydrosphere
4. The evolution of the hydrosphere
5. Methods, models and technologies
6. Issues of improving regulatory documentation
7. Monitoring, experimental and expeditionary research
8. Global and regional changes of nature and climate
9. Scientific discussions
10. Heritage
11. Chronicles

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.

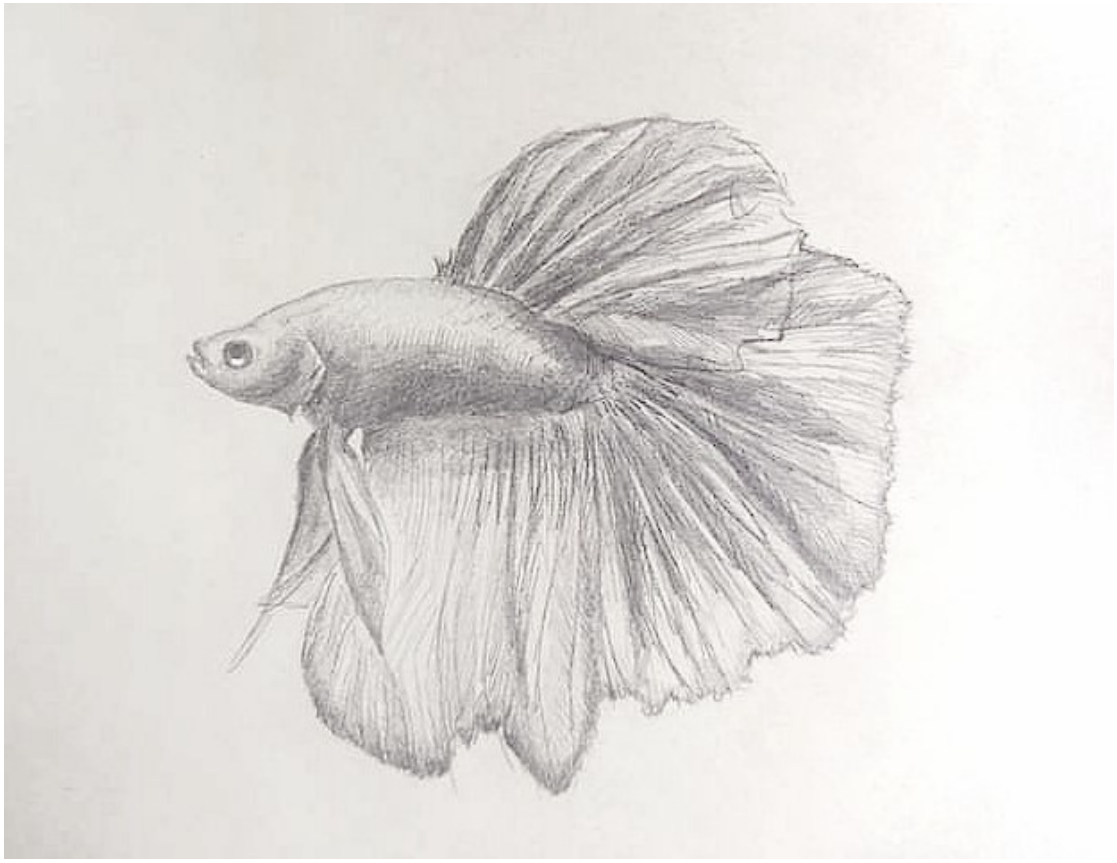
Научное издание

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 М.А. Живнач, Д.О. Мельник
Подписано в печать 18.12.2025. Формат: 60x84/8
Бумага: офсетная. Печать плоская Усл. печ. л. 19,2. Тираж 50 экз. Заказ № ____
Выход в свет 15.12.2025
Тип распространения: бесплатно на сайте журнала www.hydro-sphere.ru

Издатель: ООО НПО «Гидротехпроект» г. Санкт-Петербург, 14-я линия В.О. д. 97 пом. 3н
Для почтовых отправлений: 199155, г. Санкт-Петербург, а/я 136
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 издательстве «Лема»
г. Санкт-Петербург, 1-я линия В.О., д. 28



ISSN 2686-7877

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