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

# ГИДРОСФЕРА

## ОПАСНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ



www.hydro-sphere.ru

Том 4 Выпуск 2



**ГИДРОСФЕРА.
ОПАСНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ**

**Том 4, Выпуск 2**

**Выходит 4 раза в год**

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

**Учредители журнала**

Научно-исследовательский центр «Геодинамика»
Научно-производственное объединение «Гидротехпроект»
Институт водных проблем Российской академии наук

**Главный редактор**

академик РАН **Г.И. Долгих,** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичёва Дальневосточного отделения Российской академии наук, директор (г. Владивосток, Россия)

**Заместители главного редактора**

докт. техн. наук **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)

**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
(GIDROSFERA.
OPASNYE PROTSESSY I YAVLENIYA)**

**Volume 4, Issue 2**

**Issued 4 times per year**

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

**Founders**

Research Center «Geodynamics»
Scientific Production Association «Gidrotechproekt»
Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences

**Editor-In-Chief**

**Grigoriy I. Dolgikh,** Academician of the Russian Academy of Sciences, Director of the V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute 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, 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,** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичёва Дальневосточного отделения Российской академии наук, директор (г. Владивосток, Россия)

докт. техн. наук **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)

докт. геогр. наук, доц. **В.А. Обязов**, Научно-производственное объединение «Гидротехпроект», технический директор (г. Санкт-Петербург, Россия)

проф. **Ф. Вэй,** Институт зеленых и интеллектуальных технологий Китайской академии наук, заместитель директора (г. Чунцин, КНР)

проф. **К. Нишимура**, Японская ассоциации снега и льда, президент (г. Токио, Япония)

докт. **С. Фукс,** Институт горных рисков Университета природных ресурсов и наук о жизни, заместитель директора (г. Вена, Австрия)

**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,** Московский государственный строительный университет, профессор кафедры инженерных изысканий и геоэкологии (г. Москва, Россия)

канд. геогр. наук, с.н.с. **Т.А. Виноградова,** Научно-производственное объединение «Гидротехпроект», старший научный сотрудник (г. Санкт-Петербург, Россия)

член-корреспондент РАН **Е.Ж. Гармаев**, Байкальский институт природопользования Сибирского отделения Российской академии наук, дире-

**Editorial Council**

**Grigoriy I. Dolgikh,** Academician of the Russian Academy of Sciences, Director of the V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences (Vladivostok, Russia)

**Alexander N. Gelfan,** Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Head of the Department of River Basin Hydrology, 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)

**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)

**Sven Fuchs,** Doctor of Sciences, Deputy of Head of the Institute of Mountain Risk Engineering of the BOKU University (Vienna, Austria)

**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, professor of the Department of Engineering Survey and Geoecology of Moscow State University of Civil Engineering (Moscow, 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)

ктор (г. Улан-Удэ, Россия)
докт. геогр. наук **Б.И. Гарцман,** Институт водных проблем Российской академии наук, заведующий лабораторией гидрологии наводнений (г. Москва, Россия)
докт. физ.-мат. наук **В.К. Гусяков**, Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук, заведующий лабораторией математического 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)
докт. физ.-мат. наук **А.И. Зайцев**, Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований Дальневосточного отделения Российской академии наук, заведующий лабораторией вычислительной гидромеханики и океанографии (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)
академик РАН **Б.М. Кизяев,** Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова, научный руководитель (г. Москва, Россия)
докт. геол.-мин. наук, доц. **А.А. Лаврусевич**, Московский государственный строительный университет, заведующий кафедры инженерных изысканий и геоэкологии (г. Москва, Россия)
академик НАН Б **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 прогнозирования гидрологических процессов и экспериментальной гидрологии (г. Санкт-Петербург, Россия)

**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 the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (Yuzhno-Sakhalinsk, Russia)
**Endon Zh. Garmaev**, Corresponding Member 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)
**Boris I. Gartsman**, Doctor of Science, Head of Flood Hydrology Department of Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)
**Viacheslav K. Gusiakov**, Doctor of Science, The Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Head of the Laboratory of Mathematical Modeling of Tsunami Waves (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)
**Boris M. Kizyaev,** Academician of the Russian Academy of Sciences, Scientific Director of All-Russian Research Institute for Hydraulic Engineering and Land Reclamation (Moscow, Russia)
**Andrey A. Lavrusevich**, Doctor of Science, Head of the Department of Engineering Survey and Geoecology of Moscow State University of Civil Engineering (Moscow, Russia)
**Vladimir F. Loginov**, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Chief Researcher of Institute for Environmental Management (Minsk, Belarus)

академик НАН РК **А.Р. Медеу**, Институт географии Республики Казахстан, директор (г. Алматы, Казахстан)
докт. геогр. наук **А.В. Панин,** Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, профессор кафедры геоморфологии и палеогеографии (г. Москва, Россия)
академик НАН РК **И.В. Северский**, Институт географии Республики Казахстан, почётный директор; научный руководитель фундаментальных и прикладных исследований лаборатории гляциологии; вице-президент Международной гляциологической ассоциации (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)
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)
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)

**Mikhail L. Markov**, Associate Professor, Head of the Department of Forecasting Hydrological Processes and Experimental Hydrology of the State Hydrological Institute (Saint-Petersburg, Russia)
**Akhmetkal R. Medeu**, Academician of the National Academy of Sciences of Kazakhstan, Director of the Institute of Geography of Kazakhstan (Almaty, Kazakhstan)
**Andrey V. Panin,** Doctor of Science, professor of the Department of Geomorphology and Paleogeography of Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia)
**Igor V. Severskiy**, Academician of the National Academy of Sciences of Kazakhstan, Scientific leader of fundamental and applied researches of the Department of Glaciology of the Institute of Geography of Kazakhstan (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**, 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, Scientific Director of the Baikal Institute of Nature Management Siberian branch of the Russian Academy of sciences (Ulan-Ude, Russia)
**Tatiana A. Vinogradova,** Associate Professor, Senior Researcher of the Scientific Production Association «Gidrotechproekt» (Saint-Petersburg, Russia)
**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**, Doctor of Science, Head of Laboratory of Computational Hydromechanics and Oceanography of Special Research Bureau for Automation of Marine Researches, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (Yuzhno-Sakhalinsk, Russia)

**Технический редактор**

Информацию о принятых в печать материалах можно получить на сайте журнала или у технического редактора **Кадацкой Марии Михайловны**, 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, 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

**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 **Mariya Kadatskaya**.

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, 14th line of Vasilyevsky Island, 97 of. 3n

For corresponding:

199155 Russia, Saint-Petersburg, PO Box 136.
Editorial Board of the «Hydrosphere. Hazardous processes and phenomena»

Tel. +7(812)313-83-48,
e-mail: info@hydro-sphere.ru

# СОДЕРЖАНИЕ

**ОПАСНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ГИДРОСФЕРЕ: ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ИНЖЕНЕРНЫЕ АСПЕКТЫ** ..... **126**

**Последствия извержения вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай** Г.И. Долгих, А.В. Давыдов, С.Г. Долгих, В.В. Овчаренко, В.А. Чупин, В.А. Швец ..... 126

**МЕТОДЫ, МОДЕЛИ И ТЕХНОЛОГИИ** ..... **139**

**Оценка линейных размеров агрегатов связного грунта при размыве** А.Ю. Виноградов, В.И. Каширский, И.Ю. Лободенко, О.В. Зубова, И.А. Виноградов, Е.А. Парфенов, А.В. Кучмин, А.А. Банщиков, А.С. Войтенко ..... 139

**Эмпирическая модель распределения взвешенных наносов по глубине крупных рек** В.А. Иванов, С.Р. Чалов ..... 149

**МОНИТОРИНГОВЫЕ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ЭКСПЕДИЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ** ..... **165**

**Влияние береговых едомных обнажений на сток наносов арктических рек** С.Р. Чалов, В.М. Морейдо, К.Н. Прокопьева, В.А. Ефимов ..... 165

**Идентификация и оценка источников питания стока заболоченного водосбора в бассейне реки Западная Двина** Т.С. Губарева, Б.И. Гарцман, Л.Е. Ефимова, П.Н. Терский, П.А. Белякова, А.А. Казачук ..... 183

**Динамика изотопного состава ($^{2}$H, $^{18}$O) вод малых речных бассейнов южного Сихотэ-Алиня в летне-осенний период** В.В. Шамов, И.В. Токарев, Т.А. Михайлик, А.В. Козачек ..... 202

**ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ** ..... **216**

# CONTENTS

**HAZARDOUS PROCESSES IN THE HYDROSPHERE: FUNDAMENTAL AND ENGINEERING ASPECTS** ..... **126**

**Consequences of the eruption of the Hunga-Tonga-Hunga-Haapai volcano** Grigory I. Dolgikh, Aleksandr V. Davydov, Stanislav G. Dolgikh, Vladimir V. Ovcharenko, Vladimir A. Chupin, Vaycheslav A. Shvets ..... 126

**METHODS, MODELS AND TECHNOLOGIES** ..... **139**

**Evaluation of the linear dimensions of cohesive soil aggregates during erosion** Alexey Yu. Vinogradov, Vladimir I. Kashirskiy, Ivan Yu. Lobodenko, Oksana V. Zubova, Ivan A. Vinogradov, Evgeni A. Parfenov, Alexey V. Kuchmin, Anton A. Banshchikov, Andrey S. Voitenko ..... 139

**Empirical model of suspended sediments vertical distribution for big rivers** Victor A. Ivanov, Sergey R. Chalov ..... 149

**MONITORING, EXPERIMENTAL AND EXPEDITIONARY RESEARCH** ..... **165**

**Implications of yedoma bank outcrops on the arctic rivers sediment runoff** Sergey R. Chalov, Vsevolod M. Moreydo, Kristina N. Prokopeva, Vasily A. Efimov ..... 165

**Identification and quantification of geographical water sources in a swamp catchment in the zapadnaya dvina river basin** Tatiana S. Gubareva, Boris I. Gartsman, Ludmila E. Efimova, Pavel N. Tersky, Pelagia A. Belyakova, Alena A. Kazachuk ..... 183

**Summer-autumn variability of isotopes ($^{2}$H and $^{18}$O) in water at small mountain catchments in South Sikhote-Alin (Pacific Russia)** Vladimir V. Shamov, Igor V. Tokarev, Tatyana A. Mikhailik, Anna V. Kozachek ..... 202

**AUTHOR GUIDELINES** ..... **218**

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

УДК 550.344
DOI: 10.34753/HS.2022.4.2.126

## ПОСЛЕДСТВИЯ ИЗВЕРЖЕНИЯ ВУЛКАНА ХУНГА-ТОНГА-ХУНГА-ХААПАЙ

Г.И. Долгих, А.В. Давыдов, С.Г. Долгих, В.В. Овчаренко, В.А. Чупин, В.А. Швец
*Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичёва ДВО РАН, г. Владивосток, Россия*
dolgikh@poi.dvo.ru

**Аннотация.** К катастрофическим явлениям Земли надо отнести извержения вулканов, которые иногда приводят к гибели людей, но в основном к значительным экономическим потерям. В качестве яркого примера большой катастрофичности данных явлений можно привести события, связанные с извержением вулкана Кракатау, начавшееся в мае 1883 года и завершившееся серией мощных взрывов 26 и 27 августа 1883 года, в результате которых большая часть острова Кракатау была уничтожена. Это извержение вулкана считается одним из самых смертоносных и разрушительных в истории: около 36 417 человек погибли в результате самого извержения и вызванного им цунами, были полностью уничтожены 165 городов и поселений. Совсем недавно произошло примерно такое же событие, но мощность его была гораздо меньше мощности извержения и взрыва вулкана Кракатау. 20 декабря 2021 года на острове Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай на архипелаге Тонга началось извержение вулкана, а 15 января 2021 года в 04:15 UTC извержение перешло в активную взрывную фазу, на заключительном этапе которой вулкан взорвался. Центральная часть кальдеры вулкана площадью примерно 5 км$^2$

## CONSEQUENCES OF THE ERUPTION OF THE HUNGA-TONGA-HUNGA-HAAPAI VOLCANO

Grigory I. Dolgikh, Aleksandr V. Davydov, Stanislav G. Dolgikh, Vladimir V. Ovcharenko, Vladimir A. Chupin, Vaycheslav A. Shvets
*V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia*
dolgikh@poi.dvo.ru

**Abstract.** The catastrophic phenomena of the Earth should include volcanic eruptions, which sometimes lead to the death of people, but mostly to significant economic losses. As a vivid example of the great catastrophism of these phenomena, we can cite the events associated with the eruption of the Krakatoa volcano, which began in May 1883 and ended with a series of powerful explosions on August 26 and 27, 1883, as a result of which most of the island of Krakatoa was destroyed. More recently, approximately the same event occurred, but its power was much less than the power of the eruption and explosion of the Krakatoa volcano. On December 20, 2021, a volcanic eruption began on the island of Hunga-Tonga-Hunga-Haapai in the Tonga archipelago, and on January 15, 2021, at 04:15 UTC, the eruption turned into an active explosive phase, at the final stage of which the volcano exploded. After the explosion, a shock wave formed, which circled the Earth several times, exciting on its way regional fluctuations of individual layers of the atmosphere, seas and their parts, elastic vibrations of the Earth's crust in the infrasound frequency range. In addition, according to some data, atmospheric Lamb waves were excited, and tsunami waves were generated in certain areas of the Pacific Ocean. The article focuses on the excitation of infrasound vibrations in the


Dolgikh G.I., Davydov A.V., Dolgikh S.G., Ovcharenko V.V., Chupin V.A., Shvets V.A. Consequences of the eruption of the Hunga-Tonga-Hunga-Haapai volcano. *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2022, vol. 4, iss. 2, pp. 126–138. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2022.4.2.126.

находилась на глубинах от 150 до 200 м. По оценке специалистов NASA мощность взрыва составила 10 мегатонн в тротиловом эквиваленте. После взрыва образовалась ударная волна, которая несколько раз обогнула Землю, возбуждая на своём пути региональные колебания отдельных слоёв атмосферы, сейши морей и их частей, упругие колебания земной коры в инфразвуковом диапазоне частот. Кроме того, по отдельным данным были возбуждены атмосферные волны Лэмба, а на отдельных акваториях Тихого океана – волны цунами. В статье основное внимание уделено возбуждению инфразвуковых колебаний в системе «атмосфера – гидросфера – литосфера», вызванных проходящим атмосферным импульсом, сгенерированным при взрыве вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай.

**Ключевые слова:** вулкан; извержение; взрыв; ударная волна; инфразвуковые колебания; волны Лэмба.

atmosphere–hydrosphere–lithosphere system caused by a passing atmospheric pulse generated during the explosion of the Hunga-Tonga-Hunga-Haapai volcano.

**Keywords:** volcano; eruption; explosion; shock wave; infrasound vibrations; Lamb waves.

## Введение

15 января 2022 года в 04:14:45 UTC в Тихом океане произошло катастрофическое извержение вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хапай (рисунок 1), сопровождающееся сейсмическими и сильными волновыми возмущениями различных слоёв атмосферы [1], включая ионосферу [Adam, 2022; Duncombe, 2022]. Волны давления в атмосфере, вызванные извержением вулкана, были зарегистрированы на многих станциях системы инфразвукового мониторинга [Marty, 2019] и на барографах, расположенных в разных точках Земли.

Эти волны, которые облетели Землю по меньшей мере дважды, были зарегистрированы на различных полигонах мира. Некоторыми учёными эти волны были идентифицирована как волны Лэмба. Волны Лэмба характеризуются горизонтальным распространением со скоростью звука вдоль поверхности Земли (вертикальная составляющая колебательной скорости равна нулю) и периодами, превышающими периоды Брента – Вайсалы (около 5 минут), типичными для внутренних гравитационных волн [Gossard, Hooke, 1975]. В одной из первых [2] публикаций, появившихся после извержения вулкана, энергия извержения оценивалась в 18 мегатонн в тротиловом эквиваленте, что в 1 200 раз превышало энергию атомной бомбы, сброшенной на Хиросиму в 1945 году.

[1] Гарова Е., Ферапонтов И. Четыре сигнала Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай. Как из Москвы выглядел взрыв вулкана в Тихом океане // N+1 [Электронный ресурс]. URL: https://nplus1.ru/material/2022/01/21/tonga.

[2] Wall M. Tonga undersea volcano eruption released up to 18 megatons of energy // Space.com [Электронный ресурс]. URL: https://www.space.com/tonga-volcano-eruption-18-megatons.




**Рисунок 1.** Извержение вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай.
**Figure 1.** The eruption of the Hunga-Tonga-Hunga-Haapai volcano.

Одной из отличительных и редко наблюдаемых особенностей атмосферных проявлений эффектов извержения вулканов является «рябь» внутренних гравитационных волн в облачной системе в области извержения, которую можно чётко наблюдать на спутниковых снимках. Центральная часть кальдеры вулкана площадью около 5 км$^2$ находилась под водой на глубине 200 м (рисунок 2). По оценкам Единой геофизической службы РАН, извержение произошло в районе с географическими координатами 20.546°S и 175.39°W, с эквивалентной магнитудой землетрясения M=5,8. Энергия сейсмических колебаний была оценена приблизительно в $3{,}16 \cdot 10^{13}$ Дж. На рисунке 3 приведены времена прихода атмосферной волны в различные точки Земли.

Анализ записей датчиков, расположенных в Тихом океане по пути следования атмосферного импульса взрыва (рисунок 4) показывает, что скорости распространения этих возмущений для всех приёмных точек примерно равны скорости звука в воздухе. Это свидетельствует о том, что сигнал от места извержения до точек регистрации пришёл по воздуху, а не по воде. То есть записанные сигналы относятся скорее к метеоцунами, вызванные атмосферными возмущениями, созданными мощным взрывом. Эти возмущения были зарегистрированы микробарографами на расстоянии в несколько тысяч километров от вулкана. Наряду с импульсом в атмосфере при анализе спутниковых данных были обнаружены атмосферные гравитационные волны, сформировавшиеся в результате вертикальных перемещений частиц от поверхности моря в ионосферу [Adam, 2022].

Атмосферный импульс взрыва вулкана распространился по всей планете. Но после прохождения точек регистрации, приведённых на рисунке 4 в Тихом океане, он распространился в Японское море, где были зарегистрированы последствия его воздействия на атмосферу, водную поверхность и земную кору. В трёх точках Японского моря, отмеченных на рисунке 4, приёмными стациями были зарегистрированы колебания водной поверхности, вызванные воздействием этого импульса. На мысе Шульца Японского моря импульс взрыва и дальнейшие колебания, вызванные им, были зарегистрированы лазерным нанобарографом [Долгих и др., 2004], записывающим вариации атмосферного давления, и двумя лазерными деформографами [Долгих и др., 2017], предназначенными для регистрации вариаций деформаций верхнего слоя земной коры в месте их постановки.

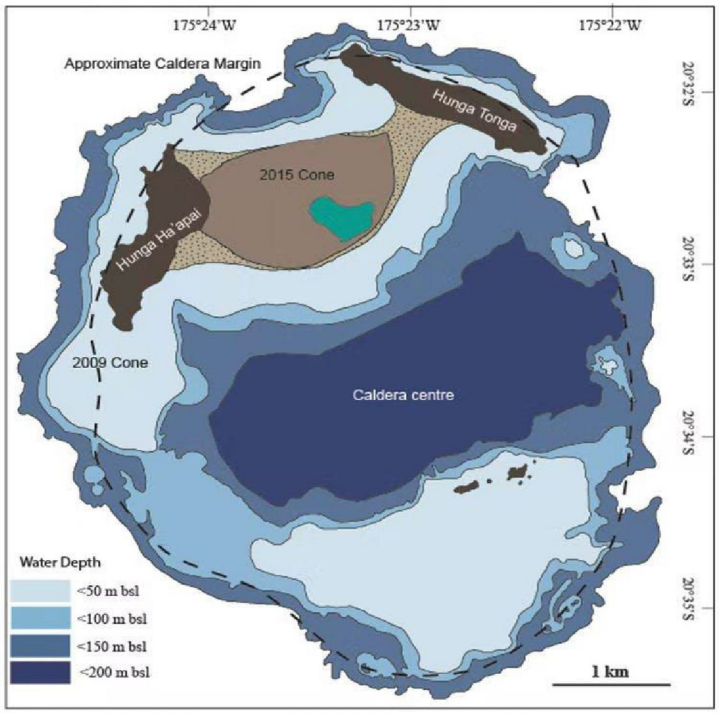



**Рисунок 2.** Глубины. Центр кальдеры на глубине от 150 до 200 м.
**Figure 2.** Depths. The center of the caldera is at a depth of 150–200 m.

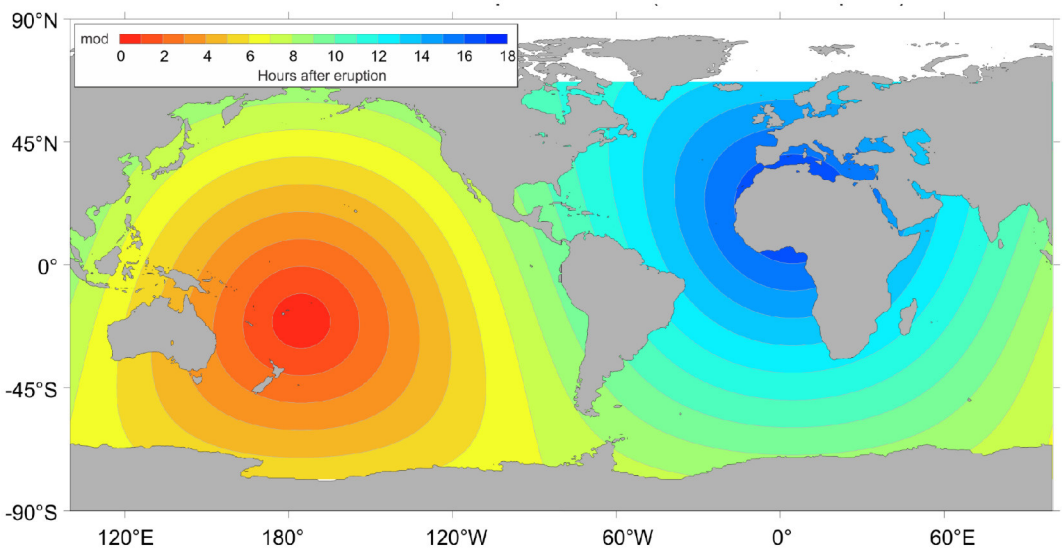



**Рисунок 3.** Время прихода атмосферной волны в часах после извержения вулкана.
**Figure 3.** The time of arrival of the atmospheric wave in hours after the eruption of the volcano.

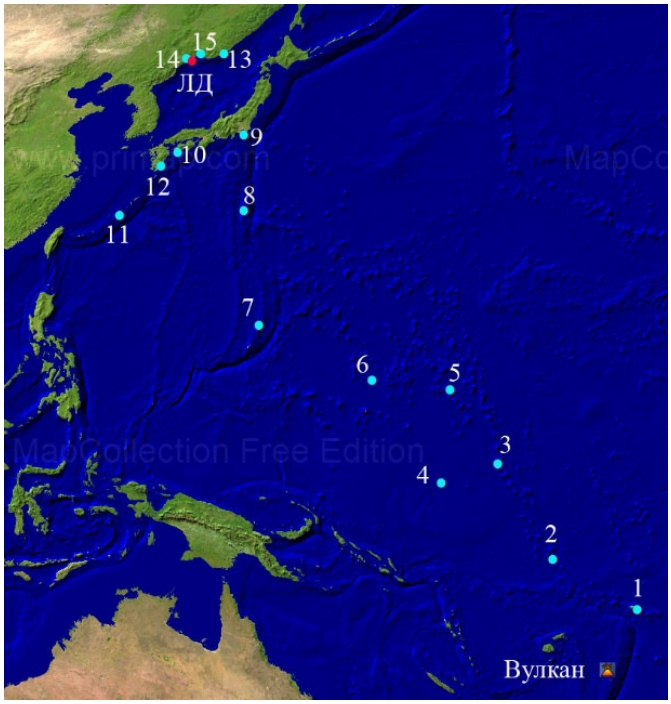



**Рисунок 4.** Расположение регистрирующих станций.
Условные обозначения: 1–12 – станции, расположенные в Тихом океане;
13–15 – станции в Японском море вблизи побережья Приморского края России.
Красным кружком отмечено место расположения лазерно-интерференционных приёмных систем.

**Figure 4.** Location of recording stations.
Symbols: 1–12 – stations located in the Pacific Ocean; 13–15 – stations in the Sea of Japan near the coast of the Primorsky Territory of Russia. A red circle marks the location of the laser interference receiving systems.

### Геосферный полигон «м. Шульца»

На морской экспериментальной станции «м. Шульца» Тихоокеанского океанологического института имени В.И. Ильичёва Дальневосточного отделения Российской академии наук с 2000 года в режиме постоянного времени начал функционировать геосферный полигон «м. Шульца», основными инструментальными средствами которого в настоящее время стали лазерно-интерференционные системы, созданные на основе равноплечих и неравноплечих интерферометров Майкельсона и частотно-стабилизированных гелий-неоновых лазеров: лазерные деформографы неравноплечего типа с длинами плеч 52,5 и 17,5 м, лазерный нанобарограф и лазерный измеритель вариаций гидросферного давления. Условная схема расположения приборов в настоящее время приведена на рисунке 5.

Лазерные деформографы, установленные на мысе Шульца обладают следующими основными характеристиками: точность измерения вариаций смещений участка земной коры при применяемых методах интерферометрии – 10 пм; рабочий диапазон частот от 0 (условно) до 1 000 Гц; динамический диапазон практически неограничен при регистрации естественных процессов, не вызывающих полное уничтожение интерференции; долговременная частотная стабильность применяемых лазеров – 9–11 знаков.

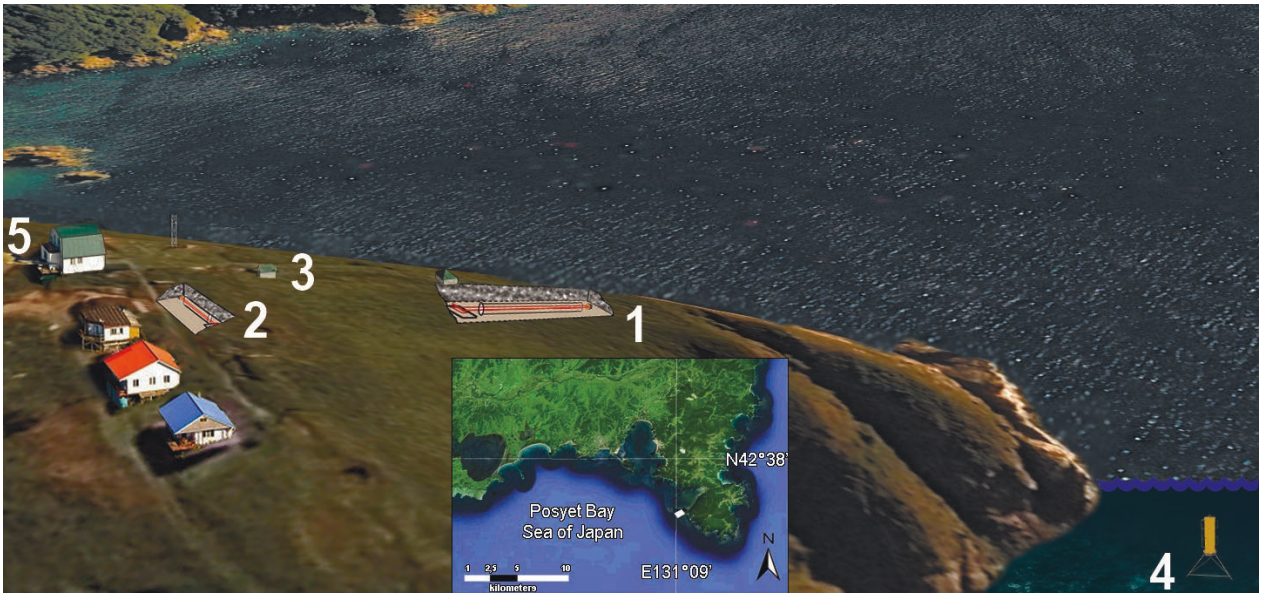



**Рисунок 5.** Международный научно-образовательный геосферный полигон. Условные обозначения: 1 – лазерный деформограф с длиной плеча 52,5 м; 2 – лазерный деформограф с длиной плеча 17,5 м; 3 – лазерный нанобарограф; 4 – лазерный измеритель вариаций гидросферного давления; 5 – здание лаборатории.

**Figure 5.** International scientific and educational geosphere polygon. Symbols: 1 – laser strainmeter with a shoulder length of 52.5 m; 2 – laser strainmeter with a shoulder length of 17.5 m; 3 – laser nanobarograph; 4 – laser meter of hydrosphere pressure variations; 5 – laboratory building.

Лазерный нанобарограф собран по схеме равноплечего интерферометра Майкельсона с применением частотно-стабилизированного гелий-неонового лазера, обеспечивающего долговременную стабильность в 9 знаке. Чувствительным элементом в лазерном нанобарографе является анероидная коробка с зеркальным напылением или с вклеенным небольшим зеркалом. Основные характеристики лазерного нанобарографа: точность измерения вариаций атмосферного давления 50 мПа; рабочий диапазон частот от 0 (условно) до 1 000 Гц; динамический диапазон практически неограничен при регистрации естественных процессов, не вызывающих полное уничтожение интерференции.

Лазерный измеритель вариаций гидросферного давления (позиция 4 на рисунке 5) устанавливается эпизодически, и во время разбираемого в статье события не был установлен на шельфе.

Полученная информация по кабельным линиям поступает в лабораторное помещение, где после предварительной обработки заносится в ранее созданную базу экспериментальных данных.

## Обработка и анализ полученных экспериментальных данных

В этом разделе статьи будем анализировать результаты, полученные при обработке данных лазерных деформографов и лазерного нанобарографа, а также доступных в интернете экспериментальных данных с морских приёмных систем, установленных в Тихом океане и в Японском море на пути движения атмосферного импульса взорвавшегося вулкана.

На рисунке 6 приведены участки записей лазерного деформографа с длиной измерительного плеча 52,5 м, лазерного деформографа с длиной измерительного плеча 17,5 м и лазерного нанобарографа. Необходимо обратить внимание на то, что записи, содержащие возмущения, вызванные взрывом вулкана, очень похожи друг на друга. При этом в начальной стадии пришедшего возмущения наблюдается мощный импульс, сформированный при взрыве. Далее, после взрыва наблюдаются постепенно затухающие низкочастотные колебания. Большая

схожесть участков записей лазерных деформографов и лазерного нанобарографа говорит о том, что зарегистрированное возбуждение (импульс) пришло по земной коре или по атмосфере. Используя время регистрации данного возмущения, время взрыва и предполагаемое прошедшее расстояние, получаем скорость распространения импульса чуть больше 300 м/с, что говорит о том, что импульс пришёл по атмосфере. Более того, колебания, зарегистрированные лазерными деформографами и лазерным нанобарографом, – это колебания, которые возбудились в атмосфере в момент прихода импульса, а не пришли от места взрыва вулкана. Колебания эти, скорее всего, относятся к собственным колебаниям атмосферных слоёв, или одного атмосферного слоя, но с возбуждением не одной, а нескольких мод этого слоя. Данное утверждение подтверждается и тем, что на записи не прослеживается дисперсионной расходимости зарегистрированных колебаний. Но, глядя на импульс, можно отметить, что несмотря на пройденное расстояние, форма его очень хорошая, то есть импульс распространялся в среде, где малое затухание или где нелинейность и дисперсия хорошо компенсируют друг друга. Ещё следует отметить интересный факт. Длины плеч лазерных деформографов относятся друг к другу как 3 к 1, т.е. измерительное плечо одного лазерного деформографа в три раза больше измерительного плеча другого лазерного деформографа. А это значит, что величины зарегистрированных смещений на лазерных деформографах должны относиться друг к другу как 3 к 1 при воздействии атмосферного возмущения, не обладающего поляризационными свойствами, если они стоят на однородной среде. Но они стоят на средах с немного разными упругими характеристиками. В работе [Dolgikh et al., 2017] было установлено, что при одинаковой атмосферной нагрузке зарегистрированные смещения лазерными деформографами должны относиться не как 3 к 1, а как 2,8 к 1. Это было установлено в тёплое, сухое время года. В нашем случае измерения выполнялись зимой, когда упругие характеристики верхнего слоя почвы изменились. Все основные конструктивные элементы этих лазерных деформографов находятся под землёй на глубине 3–5 м. Устои лазерного деформографа с длиной плеча 52,5 м смонтированы так: один устой смонтирован на скале, а другой на суглинке. Устои 17,5-метрового лазерного деформографа смонтированы на суглинке на глубинах меньших, чем устой 52,5-метрового лазерного деформографа. Таким образом зимний период привёл к тому, что сильно изменились упругие характеристики сред для одного лазерного деформографа по сравнению с другим лазерным деформографом. Это привело к тому, что отношение смещений равно 1,5 вместо 2,8, что подтверждается результатами работы [Roumelioti, Hollender, Guéguen, 2020], в которой установлено, что упругие характеристики верхнего слоя земной коры сильно зависят от метеорологических параметров. Конечно, в наших рассуждениях мы считаем, что пришедший импульс не имеет поляризации.

С целью точного определения времени фиксации атмосферного возмущения на геосферном полигоне «м. Шульца» были отфильтрованы записи 52,5-метрового лазерного деформографа и лазерного нанобарографа полосовым фильтром Хэмминга с подавлением боковых лепестков на уровне 92 дБ в полосе предполагаемого атмосферного возбуждения, то есть в полосе 0,00028–0,0033 Гц. На рисунке 7 представлены неотфильтрованные и отфильтрованные записи лазерного деформографа и лазерного нанобарографа. При анализе записей лазерного деформографа с длиной измерительного плеча 52,5 м и лазерного нанобарографа установлено, что обеими установками зарегистрировано несколько приходов атмосферного возмущения, вызванного взрывом вулкана. Первый приход атмосферного возмущения был зарегистрирован лазерным нанобарографом 15.01.2022 в 12:10 UTC, то есть через 7 ч 50 мин после взрыва. Высота этого импульса составила 220 Па (рисунок 7a). На записях лазерного деформографа также был зарегистрирован импульс в это же время, его высота составила 6,4 мкм (рисунок 7b).

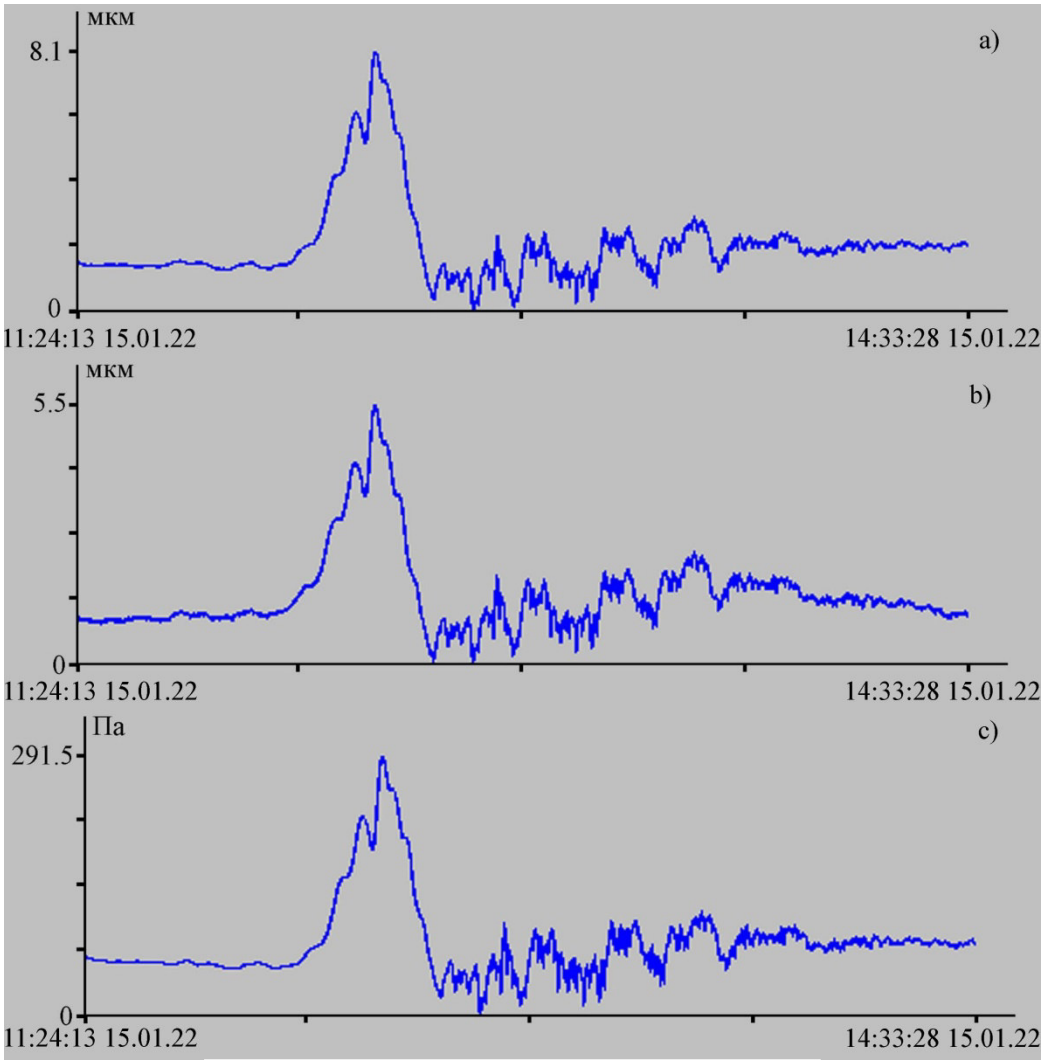



**Рисунок 6.** Синхронные участки записей 52,5-метрового лазерного деформографа (a), 17,5-метрового лазерного деформографа (b) и лазерного нанобарографа (c).

**Figure 6.** Synchronous sections of recordings of 52.5-meter laser strainmeter (a), 17.5-meter laser strainmeter (b) and laser nanobarograph (c).

Затем, обогнув земной шар, этот же импульс был зарегистрирован обоими приборами 17.01.2022. На рисунке 7a представлен участок записи лазерного нанобарографа, где стрелками обозначены оба импульса, пришедшие 15.01.2022 и 17.01.2022 в 00:44 UTC. Второй приход прямого импульса был зарегистрирован через 36 ч 40 мин после извержения. На записи лазерного нанобарографа высота импульса составила 102 Па. На участке записи лазерного деформографа (рисунок 7b) обозначены стрелками оба этих импульса, первого и обогнувшего земной шар. Высота второго импульса составила 3 мкм. Антиподальные импульсы, то есть импульсы, прошедшие от вулкана до приёмников в обратном направлении, на рисунке 7 (c, d) представлены красными стрелками. На обоих приборах этот импульс был зарегистрирован 16.01.2022 в 01:12 UTC, то есть через 20 ч 57 мин после взрыва вулкана. На записи лазерного нанобарографа высота импульса составила 47 Па, а на записи лазерного деформографа 1,3 мкм.

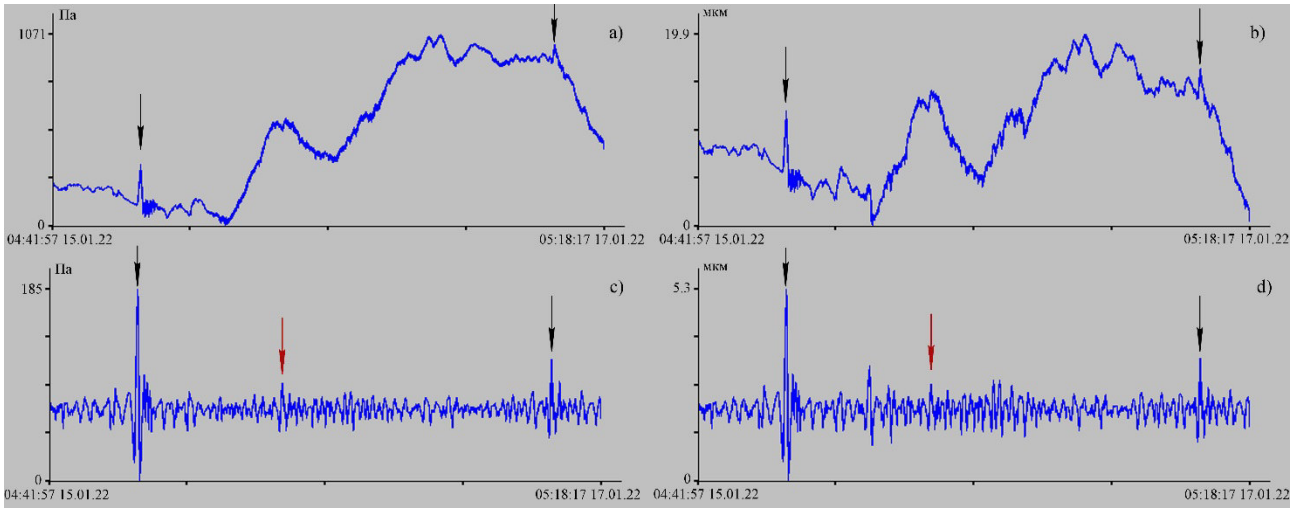



**Рисунок 7.** Синхронные участки записей лазерного нанобарографа (a), лазерного деформографа (b) и отфильтрованные синхронные участки записей лазерного нанобарографа (c), лазерного деформографа (d).

**Figure 7.** Synchronous sections of laser nanobarograph recordings (a), laser strainmeter (b) and filtered synchronous sections of laser nanobarograph recordings (c), laser strainmeter (d).

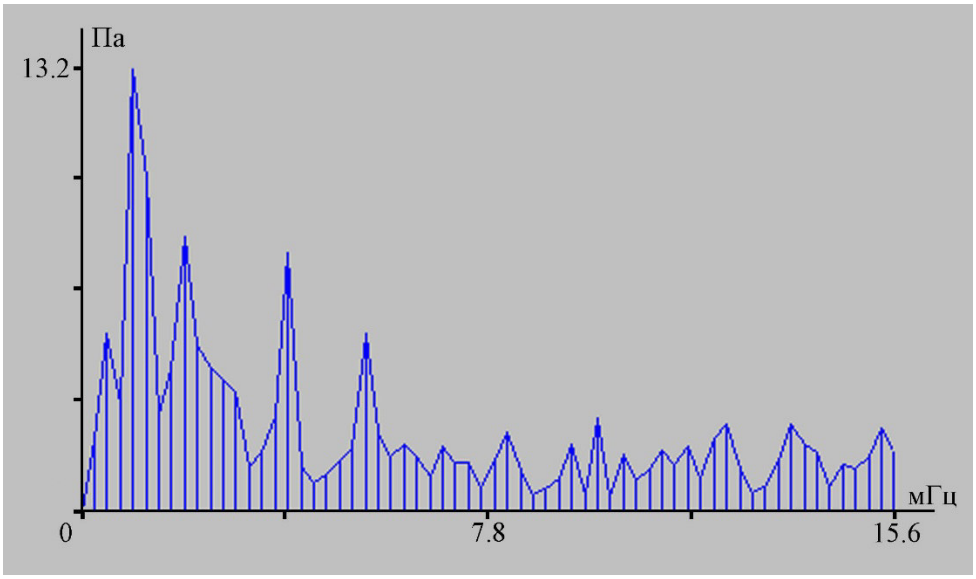



**Рисунок 8.** Спектр участка записи лазерного нанобарографа.

**Figure 8.** The spectrum of the recording area of the laser nanobarograph.

В свете вышеизложенного считаем, что пришедший импульс, сформированный взрывом вулкана, возбудил в месте расположения лазерно-интерференционных установок собственные колебания части атмосферы. Из нижнего графика рисунка 6 видно, что после атмосферного импульса в записи лазерного нанобарографа присутствуют низкочастотные колебания. При спектральной обработке этого участка записи лазерного нанобарографа (длительность участка 4 096 с при частоте дискретизации 1 Гц) получен спектр, приведённый на рисунке 8. На рисунке можно выделить четыре мощных пика на периодах: 17 мин 04,0 с (амплитуда 13,2 Па), 8 мин 32,0 с (амплитуда 8,2 Па), 4 мин 16,0 с (амплитуда 7,7 Па), 3 мин 06,2 с (амплитуда 5,3 Па), а также пик с периодом 1 мин 42,4 с (амплитуда 2,8 Па). Все выделенные колебания, кроме двух последних, можно отнести к одному объекту. По-видимому, этим объектом должен быть выделенный слой атмосферы, возможно один из геометрических размеров которого равен около 80–90 км.

Из интернета мы получили данные со всех измерительных станций, находящихся в Тихом океане и со станций, находящихся в Японском море и территориально относящиеся к России. Все эти станции записывали изменения уровня воды в Тихом океане и в Японском море. Но нигде мы не смогли обнаружить записи, характерные для цунами в соответствии с работой [Adam, 2022]. Везде время прихода возмущения, вызванного взрывом вулкана, соответствовало времени прихода возмущения по воздуху. Мы не смогли выделить сигналы с большей скоростью. Таким образом, по данным, которые можно найти в интернете, взрыв вулкана не вызвал возбуждения цунами в классическом виде. Все эти колебания, которые возникли в воде и были зарегистрированы указанными станциями можно отнести к метеоцунами, то есть цунами, которые были вызваны атмосферными процессами. В данном случае они вызваны проходящим атмосферным импульсом и возбуждёнными колебаниями атмосферных областей. При совпадении частот атмосферных колебаний и собственных колебаний отдельных частей акваторий может наблюдаться значительная по амплитуде метеоцунами, что крайне опасно для людей и техники. В таблице 1 приведены результаты спектральной обработки экспериментальных данных морских станций регистрации сигналов, указанных в первом столбце. Длительность каждого обработанного участка данных составляла 4096 с при частоте дискретизации 1 Гц. Метод обработки – быстрое преобразование Фурье. При обработке для каждой станции были выбраны по два участка – фон (до прихода сигнала возмущения) и участок сигнала возмущения. В таблице введены следующие обозначения: в первом столбце приведены названия морских станций регистрации сигналов, во втором столбце – названия участков в фоновый период и в период регистрации сигналов возмущения, в столбцах третий – пятый приведены периоды выделенных максимумов и значения относительных амплитуд, в шестом столбце – расчётная скорость распространения сигнала возмущения от вулкана до точки регистрации. Совпадающие максимумы выделены цветом.

Что надо отметить главным. Были обработаны данные четырнадцати станций, из которых в девяти станциях были выделены спектральные максимумы с периодами, совпадающими с максимумами фоновых периодов наблюдений. Это свидетельствует о том, что возбуждение данных сигналов произошло во время прихода воздушного импульса, возникшего в результате взрыва вулкана. На наш взгляд все выделенные колебания при спектральной обработке относятся к собственным (сейшам) колебаниям отдельных водных объектов или их частей, которые возбудились атмосферными процессами. Интересно отметить, что расчётные скорости везде меньше скорости звука воздуха на определённой высоте. Это свидетельствует о том, что при расчёте данных скоростей мы брали не совсем верно пройденный путь импульсом от вулкана до мест регистрации. Мы здесь не приводим сами записи всех станций, поскольку это очень громоздко (14 графиков). Они находятся в свободном доступе в интернете, их можно легко взять и проверить наши результаты.

**Таблица 1.** Статистические данные результатов обработки фоновых данных и данных сигналов возбуждения.

**Table 1.** Statistical data of the results of processing background data and excitation signal data.

| Морская станция | Участок | Максимум1 | Максимум2 | Максимум3 | Скорость, м/с |
|---|---|---|---|---|---|
| **Апия Юполу, Самоа** | Фон | 1 ч 04 мин 13 с (0,002) | 25 мин 41,4 с (0,0016) | 18 мин 21,0 с (0,0015) | |
| | Сигнал | 11 мин 56,9 с (0,032) | 30 мин 13,4 с (0,027) | 18 мин 21,0 с (0,021) | 218 |
| **Фонгафале, Тувалу** | Фон | 42 мин 48,9 с (0,0014) | 8 мин 01,7 с (0,0011) | 6 мин 35,2 с (0,00098) | |
| | Сигнал | 9 мин 52,8 с (0,0092) | 42 мин 48,9 с (0,0086) | 20 мин 33,1 с (0,0053) | 209 |
| **Бетио Тарава, Кирибати** | Фон | 32 мин 02,7 с (0,0056) | | | |
| | Сигнал | 32 мин 02,7 с (0,0068) | 7 мин 25,8 с (0,0051) | 10 мин 03,2 с (0,0046) | 212 |
| **Науру, Науру** | Фон | 51 мин 22,7 с (0,0015) | 39 мин 31,3 с (0,0013) | 13 мин 53,2 с (0,001) | |
| | Сигнал | 6 мин 15,9 с (0,0045) | 36 мин 41,9 с (0,0043) | 28 мин 32,6 с (0,0039) | 222 |
| **Кваджалейн, Маршалловы острова** | Фон | 58 мин 48,5 с (0,0026) | 5 мин 14,4 с (0,0024) | 37 мин 48,3 с (0,0022) | |
| | Сигнал | 13 мин 55,7 с (0,014) | 48 мин 07,0 с (0,011) | 9 мин 37,4 с (0,0089) | 235 |
| **Декехтик Понпеи, Микронезия** | Фон | 56 мин 58,1 с (0,0017) | 16 мин 01,3 с (0,00077) | 5 мин 53,6 с (0,00051) | |
| | Сигнал | 5 мин 53,6 с (0,0056) | 51 мин 16,3 с (0,0035) | 6 мин 29,4 с (0,0029) | 248 |
| **Сайпан, США** | Фон | 56 мин 51 с (0,0019) | 23 мин 15,4 с (0,0017) | 7 мин 12,4 с (0,0013) | |
| | Сигнал | 11 мин 53,9 с (0,011) | 9 мин 50,4 с (0,011) | 13 мин 49,7 с (0,01) | 279 |
| **Чичидзима, Япония** | Фон | 20 мин 28,0 с (0,0055) | 16 мин 30,3 с (0,0051) | 13 мин 49,7 с (0,003) | |
| | Сигнал | 20 мин 28,0 с (0,12) | 15 мин 02,9 с (0,091) | 12 мин 47,5 с (0,043) | 286 |
| **Мера, Япония** | Фон | 6 мин 09,9 с (0,0051) | 5 мин 19,8 с (0,0047) | 22 мин 14,7 с (0,0044) | |
| | Сигнал | 22 мин 14,7 с (0,11) | 6 мин 05,5 с (0,044) | 6 мин 38,7 с (0,042) | 290 |
| **Тосашимидзу, Япония** | Фон | 20 мин 28,0 с (0,015) | 39 мин 21,4 с (0,0072) | | |
| | Сигнал | 20 мин 28,0 с (0,14) | 24 мин 21,8 с (0,11) | 42 мин 38,2 с (0,054) | 290 |
| **Наха, Япония** | Фон | 26 мин 55,7 с (0,008) | | | |
| | Сигнал | 24 мин 21,8 с (0,057) | 10 мин 26,5 с (0,011) | | |
| | Сигнал | 22 мин 14,7 с (0,11) | 25 мин 34,9 с (0,089) | 19 мин 40,7 с (0,067) | 288 |
| **Преображение, Россия** | Фон | 31 мин 58,7 с (0,01) | 15 мин 59,3 с (0,0035) | | |
| | Сигнал | 30 мин 05,8 с (0,033) | 9 мин 28,5 с (0,011) | 15 мин 59,3 с (0,0074) | 293 |
| **Посьет, Россия** | ФОН | 31 мин 58,7 с (0,0029) | 17 мин 38,6 с (0,0018) | 10 мин 53,2 с (0,0012) | |
| | Сигнал | 30 мин 05,8 с (0,0072) | 17 мин 38,6 с (0,0035) | 11 мин 22,2 с (0,0012) | 287 |
| **Владивосток, Россия** | Фон | 39 мин 21,4 с (0,0081) | 31 мин 58,7 с (0,0062) | | |
| | Сигнал | 31 мин 58,7 с (0,032) | | | 286 |

## Заключение

При обработке записей лазерного нанобарографа и двух лазерных деформографов, расположенных на морской экспериментальной станции «м. Шульца» на побережье Японского моря выделены три прямых прохода и один антиподальный проход атмосферного импульса и низкочастотных колебаний, образованных в результате взрыва вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай. Установлено, что колебания земной коры в месте расположения лазерных деформографов и выделенных из их записей на периодах 17 мин 04,0 с, 8 мин 32,0 с и 4 мин 16,0 с можно отнести к собственным колебаниям отдельных областей атмосферы, сгенерированных импульсом, который сформирован в результате взрыва вулкана. Показано, что колебания с периодом 17 мин 04,0 с имеют региональное происхождение и наблюдается в другие времена при возбуждении атмосферных процессов. Колебания, близкие к выделенному периоду 3 мин 06,2 с, регистрируются в различных регионах планеты (Забайкалье (Россия), Приморский край (Россия), Тайвань), что свидетельствует об их планетарном происхождении. Первоисточник всех выделенных волновых процессов находится в атмосфере.

Атмосферный импульс при своём распространении над акваториями Тихого океана в каждом отдельном регионе возбудил собственные колебания водных масс (сейши) мест расположения регистрирующей аппаратуры. В Японском море, кроме региональных сейш, были возбуждены сейши Японского моря на периоде (30 мин 05,8 с – 31 мин 58,7 с), выделенных на всех станциях, расположенных в Японском море. Ранее данные колебания нами выделялись из записей лазерных деформографов после мощных геодинамических событий [Давыдов, Долгих, 1995].

## Благодарности

Работа выполнена по теме в рамках выполнения темы государственного задания (№ АААА-А20-120021990003-3) «Изучение фундаментальных основ возникновения, развития, трансформации и взаимодействия гидроакустических, гидрофизических и геофизических полей в Мировом океане».

## Литература

*Давыдов А.В., Долгих Г.И.* Регистрация сверхнизкочастотных колебаний 52,5-метровым лазерным деформографом // Физика Земли. 1995. № 3. С. 64–67.

*Долгих Г.И., Долгих С.Г., Ковалев С.Н., Корень И.А., Новикова О.В., Овчаренко В.В., Окунцева О.П., Швец В.А., Чупин В.А., Яковенко С.В.* Лазерный нанобарограф и его применение при его изучении баро-деформационного взаимодействия // Физика Земли. 2004. № 8. С. 82–90.

*Долгих Г.И., Ковалев С.Н., Корень И.А., Овчаренко В.В.* Двухкоординатный лазерный деформограф // Физика Земли. 1998. № 11. С. 76–81.

*Adam D.* Tonga volcano eruption created puzzling ripples in Earth's atmosphere // Nature. 2022. Vol. 601. P. 497. DOI: 10.1038/d41586-022-00127-1.

## References

Adam D. Tonga volcano eruption created puzzling ripples in Earth's atmosphere. *Nature*, 2022, vol. 601, p. 497. DOI: 10.1038/d41586-022-00127-1.

Davydov A.V., Dolgikh G.I. Recording of ultralow-frequency oscillations by a 52.5-m laser strainmeter. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 1995, vol. 31, no. 3, pp. 248–251. (Russ. ed.: Davydov A.V., Dolgikh G.I. Registratsiya sverkhnizkochastotnykh kolebanii 52,5-m lazernym deformografom. Fizika Zemli, 1995, no. 3, pp. 64–67).

Dolgikh G.I., Budrin S.S., Dolgikh S.G., Ovcharenko V.V., Chupin V.V., Yakovenko S.V. Particulars of a transmitted acoustic signal at the shelf of decreasing depth. *The Journal of the Acoustical Society of America,* 2017, vol. 142, iss. 4, pp. 1990–1996. DOI: 10.1121/1.5006904.

Dolgikh G.I., Dolgikh S.G., Kovalev S.N., Koren I.A., Novikova O.V., Ovcharenko V.V., Okuntseva O.P., Shvets V.A., Chupin V.A.,

*Dolgikh G.I., Budrin S.S., Dolgikh S.G., Ovcharenko V.V., Chupin V.V., Yakovenko S.V.* Particulars of a transmitted acoustic signal at the shelf of decreasing depth // The Journal of the Acoustical Society of America. 2017. Vol. 142. Iss. 4. Pp. 1990–1996. DOI: 10.1121/1.5006904.

*Duncombe J.* The surprising reach of Tonga's giant atmospheric waves // Eos. 2022. DOI: 10.1029/2022EO220050.

*Gossard E.E., Hooke W.H.* Waves in the Atmosphere: Atmospheric Infrasound and Gravity Waves: Their Generation and Propagation. Elsevier Scientific Publishing Company, 1975. 456 p.

*Marty J.* The IMS infrasound network: Current status and technological developments // Infrasound monitoring for atmospheric studies / Под ред. A. Le Pichon, E. Blanc, A. Hauchecorne. Springer Nature Switzerland AG, 2019. P. 3–62. DOI: 10.1007/978-3-319-75140-5_1.

*Roumelioti Z., Hollender F., Guéguen Ph.* Rainfall-Induced Variation of Seismic Waves Velocity in Soil and Implications for Soil Response: What the ARGONET (Cephalonia, Greece) Vertical Array Data Reveal // Bulletin of the Seismological Society of America. 2020. Vol. 110. No. 2. P. 441–451. DOI: 10.1785/0120190183.

Yakovenko S.V. A laser nanobarograph and its application to the study of pressure-strain coupling. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 2004, vol. 40, no. 8, pp. 683–691. (Russ. ed.: Dolgikh G.I., Dolgikh S.G., Kovalev S.N., Koren' I.A., Novikova O.V., Ovcharenko V.V., Okuntseva O.P., Shvets V.A., Chupin V.A., Yakovenko S.V. Lazernyi nanobarograf i ego primenenie pri ego izuchenii baro-deformatsionnogo vzaimodeistviya. *Fizika Zemli*, 2004, no. 8, pp. 82–90).

Dolgikh G.I., Kovalev S.N., Koren I.A., Ovcharenko V.V. A Two-Coordinate Laser Strainmeter. Izvestiya, Physics of the Solid Earth, 1998, vol. 34, no. 11, pp. 946–950. (Russ. ed.: Dolgikh G.I., Kovalev S.N., Koren' I.A., Ovcharenko V.V. Dvukhkoordinatnyi lazernyi deformograf. *Fizika Zemli*, 1998, no. 11, pp. 76–81).

Duncombe J. The surprising reach of Tonga's giant atmospheric waves. *Eos*, 2022. DOI: 10.1029/2022EO220050.

Marty J. The IMS infrasound network: Current status and technological developments In A. Le Pichon, E. Blanc, A. Hauchecorne (eds.), *Infrasound monitoring for atmospheric studies*. Springer Nature Switzerland AG, 2019. Pp. 3–62. DOI: 10.1007/978-3-319-75140-5_1.

Gossard E.E., Hooke W.H. *Waves in the Atmosphere: Atmospheric Infrasound and Gravity Waves: Their Generation and Propagation*. Elsevier Scientific Publishing Company, 1975. 456 p.

Roumelioti Z., Hollender F., Guéguen Ph. Rainfall-Induced Variation of Seismic Waves Velocity in Soil and Implications for Soil Response: What the ARGONET (Cephalonia, Greece) Vertical Array Data Reveal. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2020, vol. 110, no. 2, pp. 441–451. DOI: 10.1785/0120190183.

# МЕТОДЫ, МОДЕЛИ И ТЕХНОЛОГИИ
# METHODS, MODELS AND TECHNOLOGIES

УДК 630.3; 624.131.43
DOI: 10.34753/HS.2022.4.2.139

## ОЦЕНКА ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРОВ АГРЕГАТОВ СВЯЗНОГО ГРУНТА ПРИ РАЗМЫВЕ

А.Ю. Виноградов[1,2], В.И. Каширский[3], И.Ю. Лободенко[4], О.В. Зубова[2], И.А. Виноградов[1,5], Е.А. Парфенов[1,2], А.В. Кучмин[1,2], А.А. Банщиков[1], А.С. Войтенко[1]

*[1]ООО НПО «Гидротехпроект», г. Валдай, Россия;[2]ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова»;[3]ООО «Департамент технического заказчика» Концерн КРОСТ, г. Подольск, Россия; [4]ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», г. Москва, Россия; [5]НИУ «Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия*

gd@npogtp.ru

**Аннотация.** Для связных грунтов, к которым относятся глинистые, суглинистые и супесчаные грунты, характерна структура, в которой важное место занимают агрегаты – конгломерат «слипшихся» элементарных почвенных высокодисперсных частиц, характеризующихся большими удельной поверхностью и поверхностной энергией. Поскольку агрегаты как первичная устойчивая к размачиванию единица связного грунта предположительно целиком смываются потоком воды, правильная оценка их прочности и линейных размеров позволит делать физически обоснованные расчеты размывов дна, в том числе водопропускных, водоотводных инженерных сооружений лесных дорог и мелиоративных каналов. В статье приведен разработанный авторами подход к оценке значения сцепления грунта, основанный на измерении линейных размеров и плотности агрегатов связного грунта.

## EVALUATION OF THE LINEAR DIMENSIONS OF COHESIVE SOIL AGGREGATES DURING EROSION

Alexey Yu. Vinogradov[1,2], Vladimir I. Kashirskiy[3], Ivan Yu. Lobodenko[4], Oksana V. Zubova[2], Ivan A. Vinogradov[1,5], Evgeni A. Parfenov[1,2], Alexey V. Kuchmin[1,2], Anton A. Banshchikov[1], Andrey S. Voitenko[1]

*[1]Scientific and Industrial Research Association Gidrotehproekt, Valday, Russia;[2]Saint Petersburg State Forest Technical University, Saint-Petersburg, Russia;[3]Department of technical customer Concern KROST, Podolsk, Russia; [4]Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety, Moscow, Russia; [5]National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia*

gd@npogtp.ru

**Abstract.** For cohesive soils, which include clay, clayey and sandy loam soils, a structure is characteristic in which aggregates occupy an significant place. Since the aggregates are presumably completely washed away by the water flow, a correct assessment of their strength and linear dimensions will make it possible to make physically based calculations of bottom erosion, including culverts, drainage engineering structures of forest roads and meliorative channels. An approach developed by the authors to assess the value of soil adhesion based on measuring the linear dimensions and density of aggregates of cohesive soil is presented. As an example, calculations of the sizes of aggregates of sandy loam of various cohesive soils of quaternary ground horizons of the Priilmenskaya lowland, such as red-brown, spotted, burgundy and blue-gray dense sandy loams are presented. The simplest of the densest packages of aggregates in the soil body – hexagonal and cubic – are considered. As

*Виноградов А.Ю., Каширский В.И., Лободенко И.Ю., Зубова О.В., Виноградов И.А., Парфенов Е.А., Кучмин А.В., Банщиков А.А., Войтенко А.С.* Оценка линейных размеров агрегатов связного грунта при размыве // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2022. Т. 4. Вып. 2. С. 139–148. DOI: 10.34753/HS.2022.4.2.139.

В качестве примера представлены расчеты размеров агрегатов супесей различных связных пород четвертичных грунтовых горизонтов Приильменской низменности (разрез и лабораторное апробирование выполнены авторами в 2020 году на правом коренном берегу старицы реки Порусья, Приильменская низменность, Поддорский район, Новгородская область), таких как супесь красно-коричневая, пятнистая супесь, бордовая супесь, серо-голубая плотная супесь. Рассмотрены простейшие из плотнейших упаковок агрегатов в теле грунта – гексагональная и кубическая. В качестве рабочей гипотезы сделано предположение, что взаимное расположение агрегатов находится в гексагональной плотноупакованной решетке. Сравнительный анализ результатов усредненных измерений и рассчитанных значений линейных размеров агрегатов по предложенной методике и методике, изложенной в СП 32-102-95, показал, что прямая линейная зависимость между значением сцепления грунта и размерами агрегатов, приведенная в указанном нормативном документе, не отвечает эмпирическим данным. С падением плотности грунта его сцепление уменьшается, размеры агрегатов для большинства связных грунтов увеличиваются, при этом их прочность падает, в дальнейшем они разрушаются на более мелкие и устойчивые.

**Ключевые слова:** размыв дна; связные грунты; агрегаты грунта; сцепление грунта; пористость грунта; плотность агрегатов.

a working hypothesis, the assumption was made that the mutual arrangement of the aggregates is in a hexagonal close-packed lattice. A comparative analysis of the results of averaged measurements and the calculated values of the linear dimensions of the aggregates according to the proposed method and the method set out in SP 32-102-95, showed that the direct linear relationship between the value of soil cohesion and the dimensions of the aggregates given in the current regulatory document does not correspond to empirical data. With a decrease in the density of the soil, its cohesion decreases, the sizes of aggregates for most cohesive soils increase, while their strength decreases, in the future, they are destroyed into smaller and more stable ones.

**Keywords:** bottom erosion; cohesive soils; soil aggregates; soil cohesion; soil porosity; density of aggregates.

## Введение

В почвоведении и механике грунтов [Цытович, 1963; Воронин, 1984] под термином агрегаты понимается конгломерат «слипшихся» элементарных почвенных высокодисперсных частиц, характеризующихся большими удельной поверхностью и поверхностной энергией. Они характерны для связных грунтов, к которым согласно пункту 5.3.1 СП 32-102-95[1] относятся глинистые, суглинистые и супесчаные грунты с числом пластичности $I_p \geq 0{,}01$, при этом согласно пункту 3.2 ГОСТ 25100-2020[2] глинистым грунтом является «связный грунт, обладающий свойством пластичности за счет содержания минеральных частиц глинистой и пылеватой фракций».

[1] СП 32-102-95 Сооружения мостовых переходов и подтопляемых насыпей. Методы расчета местных размывов [Электронный ресурс]. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200003312.
[2] ГОСТ 25100-2020. Межгосударственный стандарт. Грунты. Классификация. [Электронный ресурс]. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200174302.


Vinogradov A.Yu., Kashirskiy V.I., Lobodenko I.Yu., Zubova O.V., Vinogradov I.A., Parfenov E.A., Kuchmin A.V., Banshchikov A.A., Voitenko A.S. Evaluation of the linear dimensions of cohesive soil aggregates during erosion. *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2022, vol. 4, iss. 2, pp. 139–148. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2022.4.2.139.

Разновидности глинистых (связных) грунтов по числу пластичности $I_p$ представлены в таблице Б.13 ГОСТ 25100-2020[2], где число пластичности глин $I_p>0,17$, суглинков $0,07<I_p\leq0,17$, а супесей в интервале $0,01\leq I_p\leq0,07$.

Агрегаты имеют место во всех связных грунтах. Внутриагрегатная пористость [Воронин, 1984; Кокотов, 2011] для супесей в 1,26, суглинков в 1,32 и глин в 1,40 раза меньше, чем общая пористость образца грунта. Пористость агрегатов с уменьшением их размеров понижается. Образующиеся в результате агрегирования дополнительные пустоты растут с увеличением размеров агрегатов при сохранении общей плотности грунта [Воронин, 1984].

Устойчивость агрегатов к внешнему воздействию зависит от их размеров [Кокотов, 2011], причем информация, приведенная в различных источниках диаметрально противоположная. У [Кокотов, 2011; Пестонова, 2007] чем крупнее агрегаты, тем они прочнее. У [Никитин, 1968] агрегаты глин и суглинков делятся по прочности на три группы. К относительно прочным агрегатам относятся [3] агрегаты размером менее 2 мм, к малопрочным – от 2–5 мм и к непрочным – крупнее 5 мм.

Оценка размеров агрегатов в зависимости от плотности грунта так же отличается у различных авторов. Например, одни авторы [4] считают, что при увеличении общей пористости растут и размеры агрегатов.

Действительно, при увеличении плотности структура грунта меняется. Увеличивается содержание минеральных частиц и агрегатов грунта в единице объема, формируются новые связи между ними, следовательно, увеличиваются размеры агрегатов и прочность грунта.

В [Казарновский, Лейтланд, Мирошкин, 2002] сказано, что увеличение плотности способствует повышению прочности и снижению деформируемости грунта до определенного предела, при попытках дальнейшего увеличения плотности возникает эффект переуплотнения, связанный с изменением агрегатного состава грунта.

Вероятно, с падением плотности размеры агрегатов действительно увеличиваются, при этом их прочность падает.

Размеры агрегатов используются при расчетах эрозионных размывов в связных грунтах, например, пункт 5.3 СП 32-102-95[1]. Средний диаметр смываемых частиц грунта $D$, мм в соответствии с пунктами 5.3.1, 5.3.2 и формулой 5.27 в СП 32-102-95[1] предлагается определять по следующей эмпирической зависимости:

$$D = 3z = 3 * \left(0,35 + 0,6 \cdot c_p \cdot 10^{-4}\right) \quad (1)$$

где $z$ – толщина отрывающихся отдельностей, мм;

$c_p$ – расчетное сцепление размываемого грунта, Па.

Поскольку агрегаты как первичная устойчивая к размачиванию единица связного грунта предположительно целиком смываются потоком воды, правильная оценка их прочности и линейных размеров позволит делать физически обоснованные расчеты размывов дна, в том числе водопропускных, водоотводных инженерных сооружений лесных дорог и мелиоративных каналов.

## Методика расчетов

Попробуем оценить размеры агрегатов и их зависимость от плотности почвы в естественном залегании.

Пусть объем агрегата состоит из объема самого агрегата условно округлой формы + ½ объема окружающих его пор. Тогда общий единичный объем грунта будет составлять:

$$V_{\text{общ}} = k\left(\pi R^2 + \left(R^2 - \frac{R^2}{4\pi} + 2R\left(\frac{\sigma}{2}\right)\right)\right)\frac{4}{3}R \quad (2)$$

где $R$ – средний радиус агрегата, м;

$\sigma$ – среднее расстояние между соседними агрегатами, м;

[3] Зерна и частицы несвязных грунтов [Электронный ресурс] // ArBuild.Ru – архитектурные конструкции зданий и их строительство. 2013. URL: https://arbuild.ru/gvds/338-zerna-i-chasticy-nesvyaznyh-gruntov.html.

[4] Аэрофизика – газообразная фаза почв. Тема: Воздушные свойства. [Электронный ресурс] // Present5.com. URL: https://present5.com/aerofizika-gazoobraznaya-faza-pochv-tema-vozdushnye-svojstva.

$k$ – число агрегатов в единице объема:

$$k = \frac{V_{\text{агрегат}}}{\frac{4}{3}\pi R^3}$$

где $V_{\text{агрегат}}$ – суммарный объем агрегатов в единице объема почвы, м$^3$.

В результате получаем:

$$\frac{\sigma}{R} = \pi \frac{V_{\text{общ}}}{V_{\text{агрегат}}} - \pi - \left(1 - \frac{\pi}{4}\right) \qquad (3)$$

В полученной зависимости 2 неизвестных: $R$ – средний радиус агрегата, $\sigma$ – среднее расстояние между соседними агрегатами. Отношение $\frac{\sigma}{R}$, характеризующее средние размеры агрегатов и расстояние между ними, в принципе, определяется пористостью грунта.

В качестве входного параметра используется общая пористость. Расчетные промежуточные параметры:

– внутриагрегатная пористость:

$$\varepsilon_{\text{агрегат}} = \frac{\rho_s - \rho_{\text{агрег}}}{\rho_s};$$

– общий объем агрегатов:

$$V_{\text{агрегат}} = V_{\text{общ}} - V_{\text{межагрегат}};$$

– общий объем пор вне агрегатов:

$$V_{\text{межагрегат}} = \varepsilon - \varepsilon_{\text{агрегат}};$$

– внутриагрегатная плотность:

$$\rho_{\text{агрегат}} = \rho_s(1 - \varepsilon_{\text{агрегат}}) = \text{P}_{\text{агрегат}}/V_{\text{агрегат}};$$

где $\rho_s$ – плотность частиц грунта кг/м$^3$;

$\rho_{\text{агрег}}$ – плотность агрегата кг/м$^3$;

$\varepsilon$ – пористость грунта, доли единицы;

$\text{P}_{\text{агрегат}}$ – масса агрегата, кг;

$V_{\text{агрегат}}$ – объем агрегата, м$^3$.

Рассмотрим физические характеристики тугопластичных (таблица Б.16 ГОСТ 25100-2020[2]) глинистых грунтов (текучесть 0,25–0,50) при различной пористости (таблица 1). Объем агрегатов и пустот в данном контексте выражен в долях от условного единичного.

Предположим, что максимальный размер макропор между агрегатами $\sigma$ при максимальной пористости глин 0,51 составляет 0,0005 м. Данное предположение согласуется с [Соколов, 1996]. Тогда максимальное уменьшение линейных размеров межагрегатных пор при увеличении плотности грунтов в естественном залегании с 1 331 до 1 888 кг/м$^3$ не превысит $\Delta\sigma = \sqrt[3]{V_{\text{межагрегат}} - V_{\text{межагрегат}}} = \sqrt[3]{0{,}17 - 0{,}10} < 40\%$, а с учетом уплотнений внутриагрегатных пор эта величина может понизиться еще на четверть – до 30%. Оценивая таким образом размеры микропор при различной плотности грунта, получаем усредненную величину агрегатов, которые могут быть подвержены смыву при воздействии потока воды.

Размеры агрегатов $D$ в этом случае равны: $D = 2R + 2\sigma$. Результаты расчетов приведены в таблице 2. Нормативные значения удельного сцепления элювиальных глинистых грунтов взяты из таблицы А.6 СП 22.13330.2016[5].

**Таблица 1.** Физические характеристики глинистых грунтов при различной пористости.
**Table 1.** Physical characteristics of clay soils with different porosity.

| **коэффициент пористости, e** | 0,45 | 0,55 | 0,65 | 0,75 | 0,85 | 0,95 | 1,05 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **пористость $\varepsilon_{\text{общ}}$** | 0,31 | 0,35 | 0,39 | 0,43 | 0,46 | 0,49 | 0,51 |
| **плотность сухого грунта, кг/м$^3$** | 1 888 | 1 744 | 1 644 | 1 571 | 1 483 | 1 413 | 1 331 |
| $\varepsilon_{\text{агрегат}}$ | 0,22 | 0,25 | 0,28 | 0,31 | 0,33 | 0,35 | 0,36 |
| **$\rho_{\text{агрег}}$, кг/м$^3$** | 2 133 | 2 055 | 1 977 | 1 898 | 1 840 | 1 781 | 1 742 |
| $V_{\text{межагрегат}}$ | 0,09 | 0,10 | 0,11 | 0,12 | 0,13 | 0,14 | 0,15 |
| $V_{\text{агрегат}}$ | 0,91 | 0,90 | 0,89 | 0,88 | 0,87 | 0,86 | 0,85 |
| $\sigma/R$ | 0,09 | 0,13 | 0,18 | 0,22 | 0,26 | 0,30 | 0,32 |

[5] СП 22.13330.2016. Свод правил. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83 [Электронный ресурс]. URL: https://docs.cntd.ru/document/456054206.

**Таблица 2.** Расчет размеров агрегатов в зависимости от коэффициента пористости и удельного сцепления.

**Table 2.** Calculation of the size of aggregates depending on the porosity coefficient and specific adhesion.

| **коэффициент пористости, e** | 0,45 | 0,55 | 0,65 | 0,75 | 0,85 | 0,95 | 1,05 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\sigma/R$ | 0,09 | 0,13 | 0,18 | 0,22 | 0,26 | 0,30 | 0,32 |
| $\sigma$, м | 0,00006 | 0,00008 | 0,00010 | 0,00013 | 0,00016 | 0,00021 | 0,00025 |
| $R$, м | 0,00067 | 0,00058 | 0,00056 | 0,00058 | 0,00063 | 0,00069 | 0,00078 |
| $D$, м | 0,0028 | 0,0025 | 0,0025 | 0,0026 | 0,0028 | 0,0032 | 0,0036 |
| $C$, КПа | *69* | *65* | 62 | 60 | 58 | 57 | 56 |
| $z$ по СП 32-102-951, м | 0,0045 | 0,0043 | 0,0041 | 0,0040 | 0,0038 | 0,0038 | 0,0037 |

Курсив – экстраполированные значения

## Результаты и обсуждение

Для примера проведем расчеты размеров агрегатов супесей из различных грунтовых горизонтов. Разрез и лабораторное апробирование выполнены нами в 2020 г. на правом коренном берегу старицы реки Порусья, Приильменская низменность, Поддорский район, Новгородская область. Абсолютная отметка поверхности земли 79,5 м БС. Плотность частиц супесей согласно СП 22.13330.2016[5]: $\rho_s = 2{,}70$.

Были проанализированы следующие связные породы (рисунок 1):

1. Четвертичные отложения, супесь красно-коричневая, трещиноватая, горизонт 65–105 см. Линейные размеры устойчивых к воздействию воды агрегатов из горизонта: 1–4 мм.

2. Четвертичные отложения, пятнистая супесь, плотная, горизонт 500–545 см. Линейные размеры устойчивых к воздействию воды агрегатов из горизонта: 0,5–3 мм.

3. Четвертичные отложения, бордовая супесь, плотная, горизонт 545–565 см. Линейные размеры устойчивых к воздействию воды агрегатов из горизонта: 0,3–2 мм.

4. Четвертичные отложения, серо-голубая супесь, плотная, горизонт 565–590 см. Линейные размеры устойчивых к воздействию воды агрегатов из горизонта: 2–10 мм.

Сравнительные результаты усредненных измерений и рассчитанных значений линейных размеров агрегатов по предложенной методике и методике СП 32-102-95[1] представлены в таблице 3. Коэффициент отношения пористости грунта в естественном залегании к внутренней пористости агрегатов принят равным 1,2. Расчетные значения в первом случае близки к минимальным размерам смытых потоком агрегатов. В количественном соотношении агрегатов минимального размера – 60–80% от общего числа.

Анализ зависимости (1) позволяет сделать вывод, что уменьшение значения сцепления приводит к уменьшению размеров агрегата. В нашем случае зависимость обратная. Другой вопрос, что чем меньше сцепление, тем менее прочен агрегат и меньше его плотность. Поскольку размыв, как и линия среза в приборе, предназначенном для испытания грунтов на срез, проходит по микропорам и трещинам в связном грунте, то именно размеры таких микротрещин и являются определяющими для оценки значения сцепления.

Надо иметь в виду, что при написании статьи нами использовался ограниченный объем фактического материала, а с учетом того, что в данной статье не рассматривается явление липкости грунта (агрегата), данный вопрос нуждается в дальнейшем изучении.

Проведем теоретический расчет значений сцепления исходя из измерений плотности агрегатов и расстояний между ними.

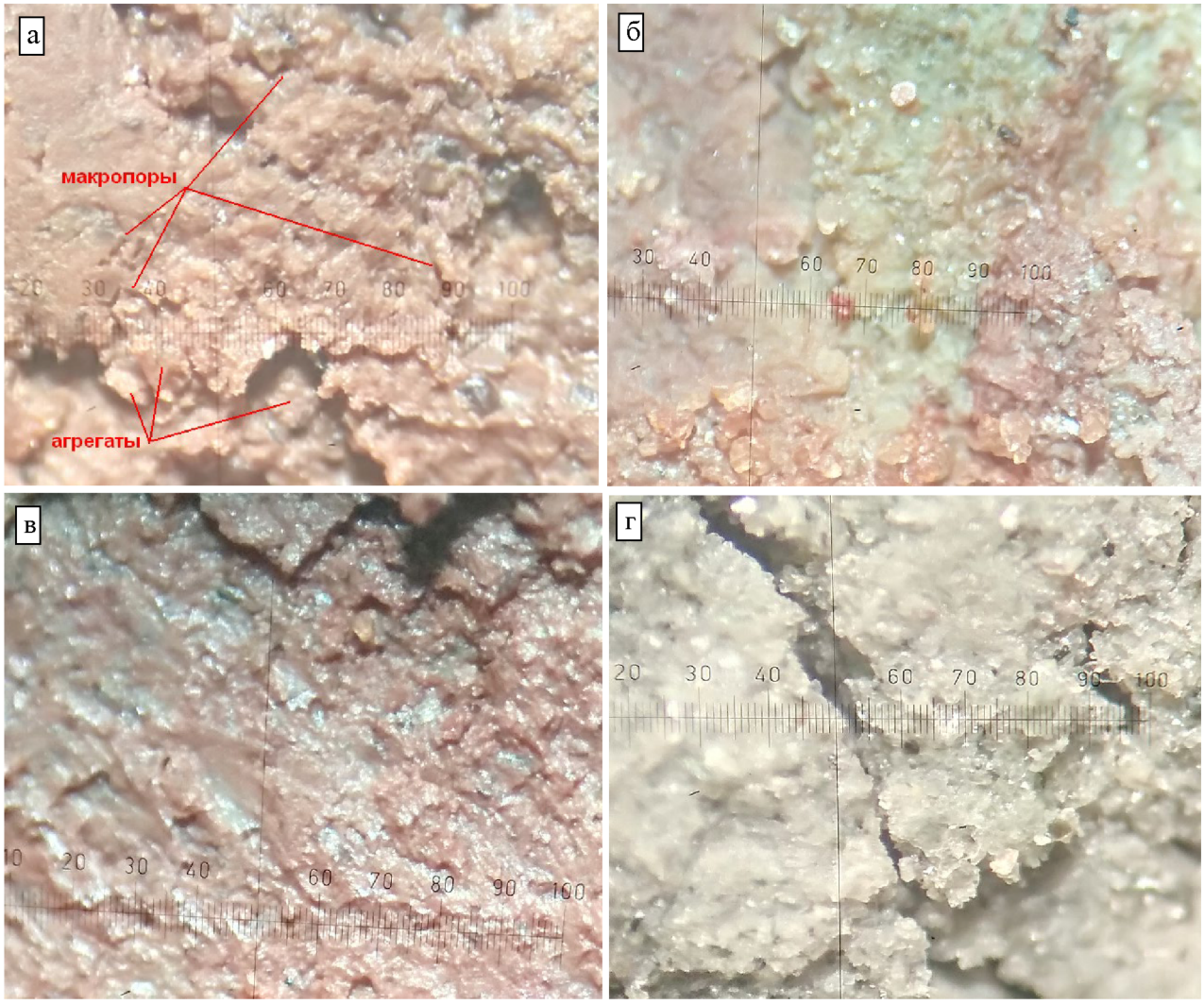



**Рисунок 1**. Связные грунты, подвергавшиеся анализу: а – красная супесь, горизонт 65–105 см в естественном залегании; б – пятнистая супесь, горизонт 500–545 см в естественном залегании; в – бордовая супесь, горизонт 545–565 см в естественном залегании; г – серо-голубая супесь, горизонт 565–590 см в естественном залегании. Увеличение в 40 раз; цена деления линейной шкалы $10^{-5}$ м.

**Figure 1.** Cohesive soils that have been analyzed: a – red sandy loam, horizon 65–105 sm in natural occurrence; б – spotted sandy loam, horizon 500–545 sm in natural occurrence; в – burgundy sandy loam, horizon 545–565 sm in natural occurrence; г – gray-blue sandy loam, horizon 565–590 sm in natural occurrence. Forty-fold magnification; scale division value $10^{-5}$ meters.

**Таблица 3**. Рассчитанные линейные размеры устойчивых к воздействию воды агрегатов связного грунта.

**Table 3.** Calculated linear dimensions of water-resistant aggregates of cohesive soil.

| порода | $\rho_{е.з.}$, г/см$^3$ | $\varepsilon$ | $\varepsilon_{агрег}$ | $\rho_{агрег}$, г/см$^3$ | $\sigma$, м | $z_{расчет}$ | $z_{измер}$ | | $z_{СП}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | мин | сред | |
| | | | | | | мм | | | |
| 1 | 1,81 | 0,49 | 0,41 | 1,92 | 0,000015 | 0,95 | 1 | 2 | - |
| 2 | 1,84 | 0,47 | 0,39 | 1,94 | 0,000009 | 0,73 | 0,5 | 1,5 | - |
| 3 | 1,88 | 0,44 | 0,36 | 1,98 | 0,000006 | 0,78 | 0,3 | 1 | 5,3 |
| 4 | 1,73 | 0,56 | 0,47 | 1,84 | 0,00005 | 1,94 | 2 | 4 | 2,6 |

Между двумя соседними агрегатами (отдельностями) в грунте имеет место сила гравитационного взаимодействия. Остальными силами (электрическими, электромагнитными, молекулярными) пренебрегаем ввиду малости и априорном отсутствии информации. Эта сила выражается зависимостью

$$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (4)$$

где $G$ – гравитационная постоянная, равная $6{,}67\cdot10^{-11}$, Н·м$^2$/кг$^2$;

$m_1,\ m_2$ – масса агрегатов, кг;

$r$ – расстояние между ними, м.

Для упрощения расчетов, будем предполагать в первом приближении, что агрегаты имеют шарообразную форму. Сцепление пород 3 и 4 оценено в 0,082 и 0,038 МПа соответственно.

Теперь необходимо оценить упаковку агрегатов в теле грунта. Характер упаковки определяется структурой и текстурой связного грунта. Согласно пункта 3.27 ГОСТ 25100-2020[2]: структура – пространственная организация элементов грунта, определяемая их размером и формой частиц, характером поверхности, количественным соотношением слагающих грунт элементов и характером структурных связей. Пункт 3.30 того же документа: текстура – характеристика строения, обусловленная ориентацией и пространственным расположением частиц грунта и его агрегатов.

Предположим, что агрегированная структура связного грунта имеет многослойную сотообразную или шаровидную плотную упаковку.

Простейшие из плотнейших упаковок — гексагональная и кубическая. В структуре с гексагональной плотнейшей упаковкой (далее – ГПУ) плотноупакованные слои чередуются таким образом, что третий располагается в точности над первым слоем, и поэтому октаэдрические пустоты (далее – ОП) непрерывно следуют вдоль направления, перпендикулярного плоскости слоев, так что создаются узкие каналы, просматривающиеся насквозь. Тетраэдрические пустоты (далее – ТП) отделены друг от друга агрегатами (далее – А) таким образом, что образуется повторяющаяся последовательность А — ТП — А — ТП — … Элементарная ячейка такой решетки – шестигранная призма, в которой А находятся в вершинах и в центре оснований призмы, а также внутри призмы – 3 агрегата. ГПУ содержит 12 агрегатов [Кемпбелл, 1975].

В структуре с кубической плотнейшей упаковкой из-за того, что поверх ОП, образованных агрегатами первого и второго слоев, размещены агрегаты третьего слоя, чередование пустот и шаров имеет иной вид: ОП — ТП — А — ТП — ОП — … При одинаковой плотности упаковки они различаются не только расположением агрегатов, но и последовательностью чередования пустот. Коэффициент заполнения пространства для обеих видов упаковки – 74,05% [Белов, 1947].

Плотноупакованные структуры имеют соседями по 12 агрегатов [Павлов, Хохлов, 1985; Судзуки, Фудзимори, Хасимото, 1987].

Плотность обычной кубической упаковки – 52,36% [Баранцева, Мизонов, Хохлова, 2008].

Согласно гипотезе Иоганна Кеплера в 1611 году, доказанной Томасом Хейлзом в 2005 году, для монодисперсных (все частицы одного размера) сферических частиц в трехмерном пространстве плотнейшая упаковка составляет 74,05% или $\frac{\pi}{3\sqrt{2}}$, а координационное число равно 12 [Белов и др., 2015].

Слой кругов можно уложить двумя способами – плотным (контактное число 4) и плотнейшим (у каждого круга в слое 6 соседей). В плотной кубической кладке центры шаров расположены по вершинам примитивной кубической ячейки, плотность упаковки составляет 52,36%. Контактное число равно 6.

Для гексагональной кладки шаров элементарной ячейкой является примитивная гексагональная плотность упаковки 60,43%. Контактное число равно 8.

**Таблица 4.** Теоретический расчет сцепления грунта при помощи усредненных размеров агрегатов.
**Table 4.** Theoretical calculation of soil cohesion using average aggregate sizes.

| Порода | $\rho$, г/см$^3$ | $\rho_{агрег}$, г/см$^3$ | $m_{агрег}$, кг | $r$, м | $F_1$, Н | $F_2$, Н | Кол-во агрегатов | $F_2 \cdot K$, Н | $\tau$, МПа |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** | **7** | **8** | **9** | **10** |
| 3 | 1,88 | 2,09 | 8,75E-06 | 0,0000015 | 2,27E-09 | 3E-08 | 8,12E+03 | 2,4E-04 | 0,06 |
| 4 | 1,73 | 2,01 | 2,27E-04 | 0,00002 | 4,84E-08 | 6,3E-07 | 1,27E+02 | 8E-04 | 0,02 |

В качестве рабочей гипотезы предполагается, что взаимное расположение агрегатов находится в гексагональной плотноупакованной решетке. Примерные расчеты приведены в таблице 4. Сила взаимодействия между двумя соседними агрегатами вычислена по формуле (4) и приведена в 6 столбце; в 7 столбце приведена суммарная сила притяжения со стороны соседних агрегатов для каждого агрегата; в 8 столбце – среднее количество агрегатов в сдвигаемой части прибора; в 9 столбце – суммарная удерживающая сила; в 10 столбце – отношение удерживающей силы к площади сдвига в приборе испытания грунта на срез (ГОСТ 20276.4-2020[6]).

По нашим наблюдениям достаточно крупные агрегаты, размерами около 1 см, оторвавшиеся при воздействии потока от основной массы связного грунта, при дальнейшем воздействии на них разрушаются на более мелкие и устойчивые.

## Выводы

Предложен подход к оценке значения сцепления грунта, основанный на измерении линейных размеров и плотности агрегатов связного грунта. Основной минус предложенного подхода – необходимость тщательного измерения плотности породы в естественном залегании и отдельных агрегатов, а также средних расстояний между агрегатами. Последняя характеристика определяется достаточно субъективно.

Положительная сторона – подход имеет физическое обоснование.

Приведенная в СП 32-102-95 прямая линейная зависимость между значением сцепления грунта и размерами агрегатов не отвечает эмпирическим данным. С падением плотности грунта, его сцепление уменьшается, размеры агрегатов для большинства связных грунтов увеличиваются, при этом их прочность падает в дальнейшем они разрушаются на более мелкие и устойчивые.

## Литература

*Баранцева Е.А., Мизонов В.Е., Хохлова Ю.В.* Процессы смешивания сыпучих материалов: моделирование, оптимизация, расчет. Иваново: ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина», 2008. 116 с.

*Белов В.В., Образцов И.В., Иванов В.К., Коноплев Е.Н.* Компьютерная реализация решения научно-технических и образовательных задач: учебное пособие. Тверь: ТвГТУ, 2015. 107 с.

## References

Barantseva E.A., Mizonov V.E., Khokhlova Yu.V. *Protsessy smeshivaniya sypuchikh materialov: modelirovanie, optimizatsiya, raschet [Bulk materials mixing processes: modeling, optimization and calculation]*. Ivanovo, Publ. of Ivanovskii gosudarstvennyi energeticheskii universitet im. V.I. Lenina, 2008. 116 p. (In Russian).

Belov V.V., Obraztsov I.V., Ivanov V.K., Konoplev E.N. *Komp'yuternaya realizatsiya resheniya nauchno-tekhnicheskikh i obrazovatel'nykh zadach: uchebnoe posobie [Computer implementation of the solution of*

[6] ГОСТ 20276.4-2020. Межгосударственный стандарт. Грунты. Метод среза целиков грунта. [Электронный ресурс]. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200174757.

*Белов Н.В.* Структура ионных кристаллов и металлических фаз. М.: Изд. АН СССР, 1947. 237 с.

*Воронин А.Д.* Структурно-функциональная гидрофизика почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1984. 204 с.

*Казарновский В.Д., Лейтланд И.В., Мирошкин А.К.* Основы нормирования и обеспечения требуемой степени уплотнения земляного полотна автомобильных дорог. М.: ФГУП «Союздорнии», 2002. 53 с.

*Кемпбел Дж.А.* Современная общая химия. Том 3 / Пер. с англ. канд. хим. наук Е.Л. Розенберга; под ред. д-ра хим. наук проф. Е.М. Соколовской. М.: Мир, 1975. 446 с.

*Кокотов Ю.А.* Исследование механической прочности, пористости и плотности воздушно-сухих почвенных агрегатов // Агрофизика. 2011. № 2. С. 50–54.

*Никитин В.П.* Исследование технологии строительства цементогрунтовых дорожных одежд и перспективы ее совершенствования // Опыт и перспективы строительства автомобильных дорог с использованием местных материалов. Омск: Зап.-Сиб. кн. изд-во, 1968. С. 93–110.

*Павлов П.В. Хохлов А.Ф.* Физика твердого тела: учебное пособие для вузов по спец. "Физика". М.: Высшая школа, 1985. 384 с.

*Пестонова Е.А*. Механическая прочность почвенной структуры: взаимосвязь с физическими свойствами и основной гидрофизической характеристикой. Автореф. дисс. … канд. биол. наук. М., 2007. 26 с.

*Соколов В.Н.* Проблема лессов // Соросовский образовательный журнал. 1996. №. 9. С. 86–93.

*Судзуки К., Фудзимори Х., Хасимото К.* Аморфные металлы / Под ред. проф. Ц. Масумото. Пер. с японского Е.И. Поляка; под ред. канд. техн. наук И.Б. Кекало. М: Металлургия, 1987. 328 с.

*Цытович Н.А.* Механика грунтов (краткий курс): учебник для строительных вузов. М.: Высшая школа, 1983. 288 с.

*scientific, technical and educational problems: study guide]*. Tver': Publ. of TvGSU, 2015. 107 p. (In Russian).

Belov N.V. *Struktura ionnykh kristallov i metallicheskikh faz [Structure of ionic crystals and metallic phases]*. Moscow, Publ. of AN SSSR, 1947. 237 p. (In Russian).

Voronin A.D. *Strukturno-funktsional'naya gidrofizika pochv [Structural and functional hydrophysics of soils]*. Moscow, Publ. of MSU, 1984. 204 p. (In Russian).

Kazarnovskii V.D., Leitland I.V., Miroshkin A.K. *Osnovy normirovaniya i obespecheniya trebuemoi stepeni uplotneniya zemlyanogo polotna avtomobil'nykh dorog [Fundamentals of rationing and ensuring the required degree of compaction of the subgrade of highways]*. Moscow, Publ. Soyuzdornii, 2002. 53 p. (In Russian).

Campbell J.A. *Chemical systems. Energetics, dynamics, structure*. San Francisco, Publ. W.H. Freeman and company, 1970. 1095 p. (Russ. ed.: Kempbel Dzh.A. *Sovremennaya obshchaya khimiya. Tom 3* / Per. s angl. kand. khim. nauk E.L. Rozenberga; pod red. d-ra khim. nauk prof. E.M. Sokolovskoi. Moscow, Publ. Mir, 1975. 446 p.)

Kokotov Yu.A. Issledovanie mekhanicheskoi prochnosti, poristosti i plotnosti vozdushno-sukhikh pochvennykh agregatov [Investigation of mechanical properties, porosity and density of air-dry soil aggregates]. *Agrofizika [Agrophysics]*, 2011, no. 2, pp. 50–54. (In Russian; abstract in English).

Pavlov P.V. Khokhlov A.F. *Fizika tverdogo tela: uchebnoe posobie dlya vuzov po spetsial'nosti "Fizika" [Solid state physics. Study guide for students]*. Moscow, Publ. Vysshaya shkola, 1985. 384 p. (In Russian).

Pestonova E.A. *Mekhanicheskaya prochnost' pochvennoi struktury: vzaimosvyaz' s fizicheskimi svoistvami i osnovnoi gidrofizicheskoi kharakteristikoi. Avtoref. diss. kand. biol. nauk [Mechanical strength of soil structure: relationship with physical properties and the main hydrophysical*

*characteristic. Ph. D. (Biology) Thesis]*. Moscow, 2007. 26 p. (In Russian).

Sokolov V.N. Problema lessov [Loess problem]. *Sorosovskii obrazovatel'nyi zhurnal [Soros educational journal]*, 1996, no. 9, pp. 86–93. (In Russian; abstract in English).

Sudzuki K., Fudzimori Kh., Khasimoto K. *Amorfnye metally [Amorphous metals]*. Moscow, Publ. Metallurgiya, 1987. 328 p. (In Russian, translation from Japanese).

Tsytovich N.A. *Mekhanika gruntov (kratkii kurs): uchebnik dlya stroitel'nykh vuzov [Soil mechanics (short course): a textbook for construction universities]*. Moscow, Publ. Vysshaya shkola, 1983. 288 p. (In Russian).

УДК 911.2

DOI: 10.34753/HS.2022.4.2.149

# ЭМПИРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЗВЕШЕННЫХ НАНОСОВ ПО ГЛУБИНЕ КРУПНЫХ РЕК

В.А. Иванов[1], С.Р. Чалов[1,2]

*[1]МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия*

*[2]Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия*

viktoro.1998@yandex.ru

**Аннотация.** Мутность воды, или концентрация взвешенных наносов, является одной из основных характеристик водного потока. Данный параметр является необходимой водохозяйственной характеристикой речного потока для прогнозирования русловых переформирований. Мутность воды является нормативной характеристикой качества воды для хозяйственного использования, поскольку с частицами взвеси переносится множество патогенных микроорганизмов и сорбируются тяжелые металлы, а повышенные значения мутности губительны для многих видов водных организмов. Данная высокая социально-экономическая и гидролого-экологическая значимость актуализирует изучение точности оценок взвешенных наносов и их пространственного распределение внутри поперечного сечения реки. В данной статье были рассмотрены особенности распределения мутности воды и их гидравлических факторов на реках России (Лена, Обь, Енисей, Колыма, Дон, Кубань, Терек, Селенга). Так, были обработаны 78 измерений поперечных профилей потока, выполненных Акустическим Доплеровским Профилографом Течений RiverRay 600 kHz, в сумме составивших 40 079 вертикальных распределений обратного рассеяния лучей прибора по глубине, переведенных в единицы весовой мутности. Для всех измерений был выполнен расчет среднего числа Рауза для поперечного профиля, и далее – для частных вертикалей через введение переводного коэффициента. В результате были получены

# EMPIRICAL MODEL OF SUSPENDED SEDIMENTS VERTICAL DISTRIBUTION FOR BIG RIVERS

Victor A. Ivanov[1], Sergey R. Chalov[1,2]

*[1]Lomonosov MSU, Moscow, Russia*

*[2]Kazan Federal University, Kazan, Russia*

viktoro.1998@yandex.ru

**Abstract.** The suspended sediment concentration (SSC) is one of the main characteristics of the water flow. This parameter is a necessary water management characteristic of the river flow for forecasting channel transformations. Furthermore, SSC is a normative characteristic of water quality, because of many pathogenic microorganisms are transported with suspended particles and heavy metals are sorbed, and increased SSC values are pure for many types of aquatic organisms. This high socio-economic and hydrological-ecological significance actualizes the study of the SSC accuracy of estimates and their spatial distribution within the cross-section of the river. This study presents the distribution of water turbidity and hydraulic parameters on the Russia rivers (Lena, Ob, Yenisei, Kolyma, Don, Kuban, Terek, Selenga). 78 measurements of river cross-sections made by the Acoustic Doppler Current Profiler RiverRay 600 kHz were made, that gave 40,079 vertical distributions of backscatter intensity, calculated into units of suspended sediment concentration. Thus, for all cross-sections and verticals the Rouse number was calculated. 78 models of vertical suspended sediments concentration distribution as a function of depth, flow velocity and particle diameter were obtained. For 8 models, the correlation coefficients to the measured values were more than 0.9. For these calculations the authors developed a software in the programming language R, which input parameters were raw data of measurements by ADCP, and the result of calculations was suspended sediments and hydraulic characteristics of the flow. These models, that was developed by machine learning technics, are

*Иванов В.А., Чалов С.Р.* Эмпирическая модель распределения взвешенных наносов по глубине крупных рек // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2022. Т. 4. Вып. 2. С. 149–164. DOI: 10.34753/HS.2022.4.2.149.

78 моделей вертикального распределения мутности как функция глубины вертикали, скорости потока и диаметру частиц. Для 8 моделей коэффициенты корреляции к измеренным значениям составили более 0,9. Для произведения данных расчетов авторами статьи было разработано программное обеспечение на языке программирования *R*, для которого входными параметрами являлись сырые данные измерений, а результатом расчетов являлись мутностные и гидравлические характеристики потока. Указанные модели, полученные при помощи машинного обучения, рекомендованы для дальнейшего применения при изучении особенностей движения взвешенных наносов больших рек.

**Ключевые слова:** Акустический Доплеровский Профилограф Течения; мутность; косвенные методы; русловые процессы; качество воды; обратное рассеяние; число Рауза.

recommended for further use in studying the features of the movement of suspended sediments of large rivers.

**Keywords:** Acoustic Doppler Current Profiler; suspended sediments concertation; remote sensing; channel processes; water quality; backscatter intensity; Rouse number.

## Введение

Акустические методы в гидрологии основаны на оценке скорости потока в единице объема воды путем измерения доплеровского смещения частоты ультразвукового сигнала, излучаемого прибором Акустический Доплеровский Профилограф Течения (далее – АДПТ) и отраженного от взвешенных веществ в этом объема. Для измерения расхода воды АДПТ устанавливается на движущейся лодке или другом судне и передает акустические сигналы в толщу воды в направлении дна реки. Эхо-сигналы, отраженные от мелких частиц минерального и органического вещества, называются интенсивностью обратного рассеяния. Последнее впоследствии приписывается различным глубинам в пределах измеренного диапазона до дна, что приводит к вертикальному профилю обратного рассеяния и скорости. Кроме того, обычно АДПТ дополнительно оснащены эхолотами и GPS-приемниками, которые позволяют проводить измерения в локальной (путем отслеживания дна реки) и глобальной системе координат [Mueller et al., 2013]. Результаты первых применений акустических методов для измерения концентрации взвешенных наносов выявили большой потенциал этого подхода [Thorne et al., 1991; Deines, 1999; Holdaway et al., 1999; Mullison, 2017]. Во многих работах были попытки учесть погрешности, связанные с диаметром и формой частиц, что также непосредственно влияет на параметр обратного рассеяния [Thorne, Hanes, 2002; Thorne, Meral, 2008; Hanes, 2012; Moore et al., 2013]. Акустический метод широко использовался для изучения крупных приливных рек [Wall, Nystrom, Litten, 2006], слияний рек [Szupiany et al., 2009; Hackney et al., 2018; Szupiany et al., 2019], оценки стока наносов во время паводков [Guerrero, Federico, 2018]. Акустический метод во многом позволил лучше понять пространственное и временное распределение мутности, а сам по себе данный метод является более быстрым и дешевым по сравнению с традиционными методами [Latosinski et al., 2014; Topping, Wright, 2016]. На сегодняшний день существует множество региональных исследований, в которых акустический метод применяется с некоторыми эмпирическими дополнениями для


Ivanov V.A., Chalov S.R. Empirical model of suspended sediments vertical distribution for big rivers. *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2022, vol. 4, iss. 2, pp. 149–164. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2022.4.2.149.

рек и эстуариев по всему миру. Тематические исследования были посвящены дельте реки Махакам в Индии [Sassi, Hoitink, Vermeulen, 2012], таким крупным рекам, как река Фрейзер в Канаде [Venditti et al., 2016], Дунай [Pomázi, Baranya, 2020], Рона [Sakho et al., 2019] и малым рекам Анатолийского полуострова [Elçi, Aydın, Work, 2009]. Существует множество исследований о применении АДПТ для мониторинга качества воды [Moore et al., 2013; Aleixo et al., 2020]. Значительная часть исследований предусматривает сравнение акустических и других косвенных методов, таких как лазерная дифракция и нефелометрия [Agrawal, Hanes, 2015; Pomázi, Baranya, 2020]. Измерение расхода АДПТ обеспечивает получение большого объема данных об обратном рассеянии и скорости, которые получаются при каждом измеренном поперечном профиле. На данный момент было разработано несколько программных средств для оценки концентрации взвеси по данным обратного рассеяния, например: STA, описанный в [Dominguez Ruben et al., 2020]; ASET, используемый в [Szupiany et al., 2016]; коммерческое программное обеспечение, такое как ViSea от Aquavision для обработки данных АДПТ. Тем не менее вышеупомянутое программное обеспечение в основном рассчитано на вычисление расхода взвешенных наносов и не производит обработку данных о концентрации наносов в поперечном сечении реки в сочетании с морфометрической и гидравлической информацией. Современные высокоуровневые языки программирования, такие как R, Python и так далее, представляют собой надежную основу для разработки такой методики, которая может улучшить понимание поведения наносов и связанных с ними гидрологических явлений.

## Методы

### *Описание исходной базы данных*

Для исследования распределения концентрации взвеси по перечному сечению авторами была собрана база данных из 78 поперечных профилей рек, выполненных прибором River Ray 600 kHz, на реках Терек, Обь, Колыма, Дон, Кубань, Енисей, Селенга и Лена (таблица 1). Для всех рек пробоотбор происходил в устьевых и предустьевых областях, в том числе и в рукавах дельт (Селенга, Дон, Кубань, Лена) (рисунок 1), что обуславливает разнообразие гидравлических условий, необходимых для определения общих закономерностей движения наносов в реках. Помимо измерений АДПТ производился отбор проб взвешенных наносов для всех рек в 2–9 точках по поперечному сечению рек насосом с лодки, определение мутности в пробах производилось гравиметрическим методом, определение диаметра взвеси происходило методом лазерной дифракции.

Таким образом, для анализа распределения мутности был собран массив данных, состоящий из 601 196 точек с известным значением мутности, расстоянием от берега, глубиной точки и профиля, а также значением скорости. Из 78 профилей только для 26 профилей имеются данные о гранулометрическом составе взвеси, среди которых данные о среднем диаметре взвеси ($D_{50}$), процентном содержании частиц определенного диаметра по [Караушев, 1977]: глины PM1 ($d$<0,001 мм), песка PM100-1000 (0,1<d<1 мм).

Для всех профилей рассчитаны переменные – потенциальные предикторы стока наносов: относительная глубина от дна $z$ (1), относительное расстояние от стрежня $dist_{norm}$ (2), нормированные значения скорости (3) и глубины вертикали (4, 5) (Рисунок 2).

$$z = \frac{h_b}{h} \quad (1)$$

где z – относительная глубина (0:1);

$h_b$ – расстояние от поверхности, м;

$h$ – глубина вертикали, м.

$$dist_{norm} = \frac{|dist_c - dist|}{dist_c} \quad (2)$$

где $dist_{norm}$ – относительное расстояние от стрежня;

$dist_c$ – расстояние от берега точки с максимальной глубиной, м (приближенная оценка стрежня);

$dist$ – расстояние от берега, м.

**Таблица 1.** Описание базы данных профилей.
**Table 1.** Study cross-sections main characteristics.

| Река, год | Кол-во профилей | Расход воды, м³/с | Макс. глубина, м | Ширина реки, м | Ср. глубина, м | Ср. обр. рассеяние ДБ/м | Ср. скорость, м/с | Расход наносов, кг/с | Ср. число Рауза | Ср. диаметр взвеси, мм | Содержание глины*, % | Содержание песка**, % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Дон, 2021 | 12 | 59–597 | 2–9 | 346–559 | 1–6 | 22,2–98 | 0,09–1 | 10–82 | 0,15–1,55 | 0,11–0,27 | 2,1–2,3 | 17,8–23,2 |
| Енисей, 2019 | 7 | 4 270–106 000 | 30–65 | 393–1 820 | 16–28 | 65,9–74 | 0,46–1,82 | 318–9 275 | 0,13–0,2 | 0,06 | 4,05 | 6,98 |
| Колыма, 2019 | 2 | 8 160–8 800 | 12–16 | 2 801–3 090 | 6–7 | 60–61 | 0,48–1 | 490–556 | 0,24–0,3 | – | – | – |
| Кубань, 2021 | 12 | 3–121 | 2–6 | 8–127 | 2–4 | 76–87 | 0,05–0,43 | 0–16 | 0,21–1,27 | 0,03 | 8,2 | 0 |
| Обь, 2018, 2019 | | 12 000–34 000 | 21–28 | 1 720–2 260 | 10–13 | 67–84 | 0,58–1,07 | 1 478–2 736 | 0,21–0,49 | 0,09–0,22 | 3,23–7,91 | 3,63–24 |
| Селенга, 2018 | 11 | 274–2 680 | 2–10 | 70–399 | 2–5 | 97–108 | 0,54–2 | 59–564 | 0,81–2,76 | 0,01–0,02 | 34,3–45,17 | 0,17–5,87 |
| Терек, 2020 | 23 | 193–253 | 3–5 | 73–145 | 2–3 | 87–94 | 0,74–0,96 | 27–35 | 0,63–1,2 | 0,06–0,07 | 14–17,85 | 16,8–18,45 |
| Лена, 2022 | 2 | 2 317–33 630 | 10–37 | 1 074–1 567 | 6–21 | 82–86 | 0,46–1 | 296–3 812 | 0,43–2,46 | 0,04–0,04 | 5,27–5,67 | 0,17–0,77 |

* глина по [Караушев, 1977] средний диаметр <0,001 мм, PM1
** песок по [Караушев, 1977] средний диаметр от 0,1 до 1 мм, PM100-1000

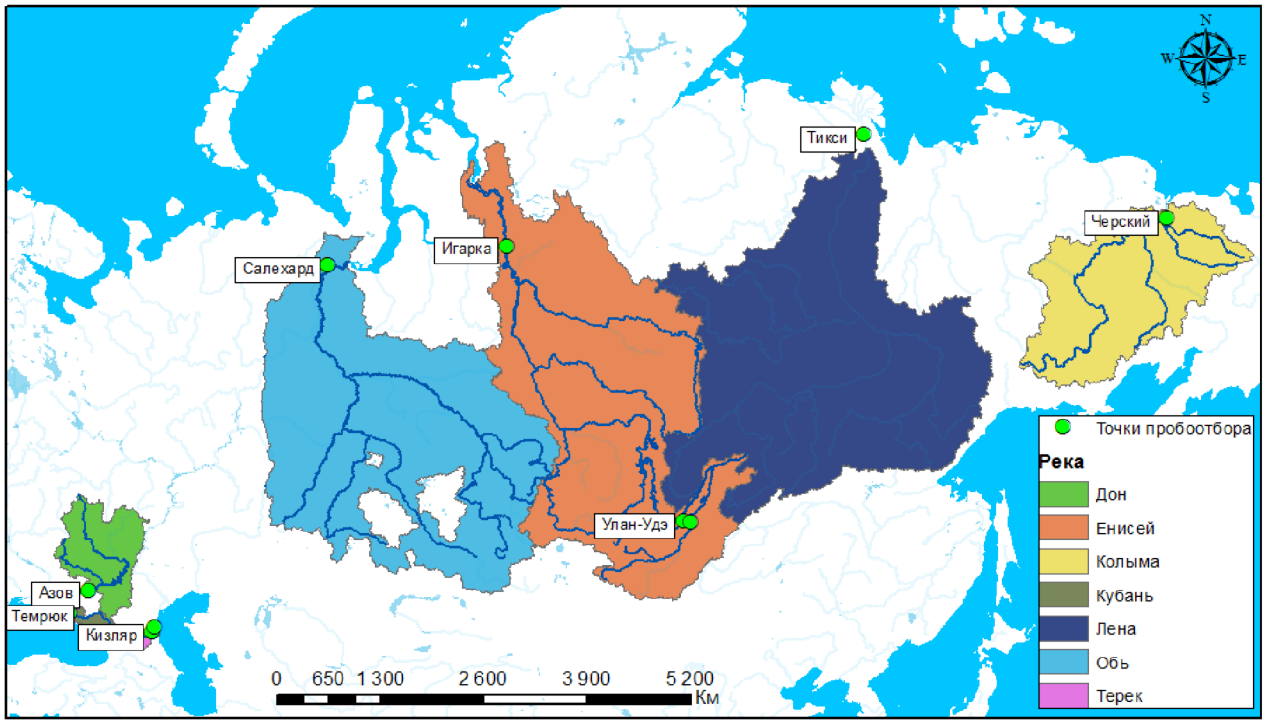



**Рисунок 1.** География исходных данных для анализа.
**Figure 1.** Study rivers watersheds mapping.

$$norm_v = \frac{v_{ij}}{v_{cp}} \quad (3)$$

где $norm_v$ – относительная скорость;

$v_{ij}$ – среднее значение скорости в точке с расстоянием от берега $i$ и глубиной $j$;

$v_{cp}$ – среднее значение скорости профиля.

$$norm_{h_{mean}} = \frac{h_{ij}}{\sum \frac{h_{ij}}{n}} \quad (4)$$

где $norm_{h_{mean}}$ – стандартизированная глубина вертикали по среднему значению глубины поперечного профиля реки.

$$norm_{h_{max}} = \frac{h_{ij}}{\max\left(\frac{h_{ij}}{n}\right)} \quad (5)$$

где $norm_{h_{max}}$ – стандартизированная глубина вертикали по максимальному значению глубины поперечного профиля реки.

Также стоит отметить, что в случае нижнего предела расчета концентрации в исходной формуле Рауза используется глубина $a=2D_{50}$, которую приближенно можно считать за границу разделения между влекомым и взвешенным стоком. В данном слое существует переход от влекомого к взвешенному перемещению частиц, ниже данной границы происходит в том числе грядовое движение наносов, а также располагаются неподвижные русловые отложения (рисунок 2). При измерениях АДПТ в нижней части профиля образуется область неопределенных значений, связанная с особенностью работы прибора. Увеличивающаяся в зависимости от максимальной глубины вертикали, данная глубина была принята за граничное значение $a$, что сводит задачу данной работы к исследованию распределения мутности в пределах измерения АДПТ. В данном слое по большей части также

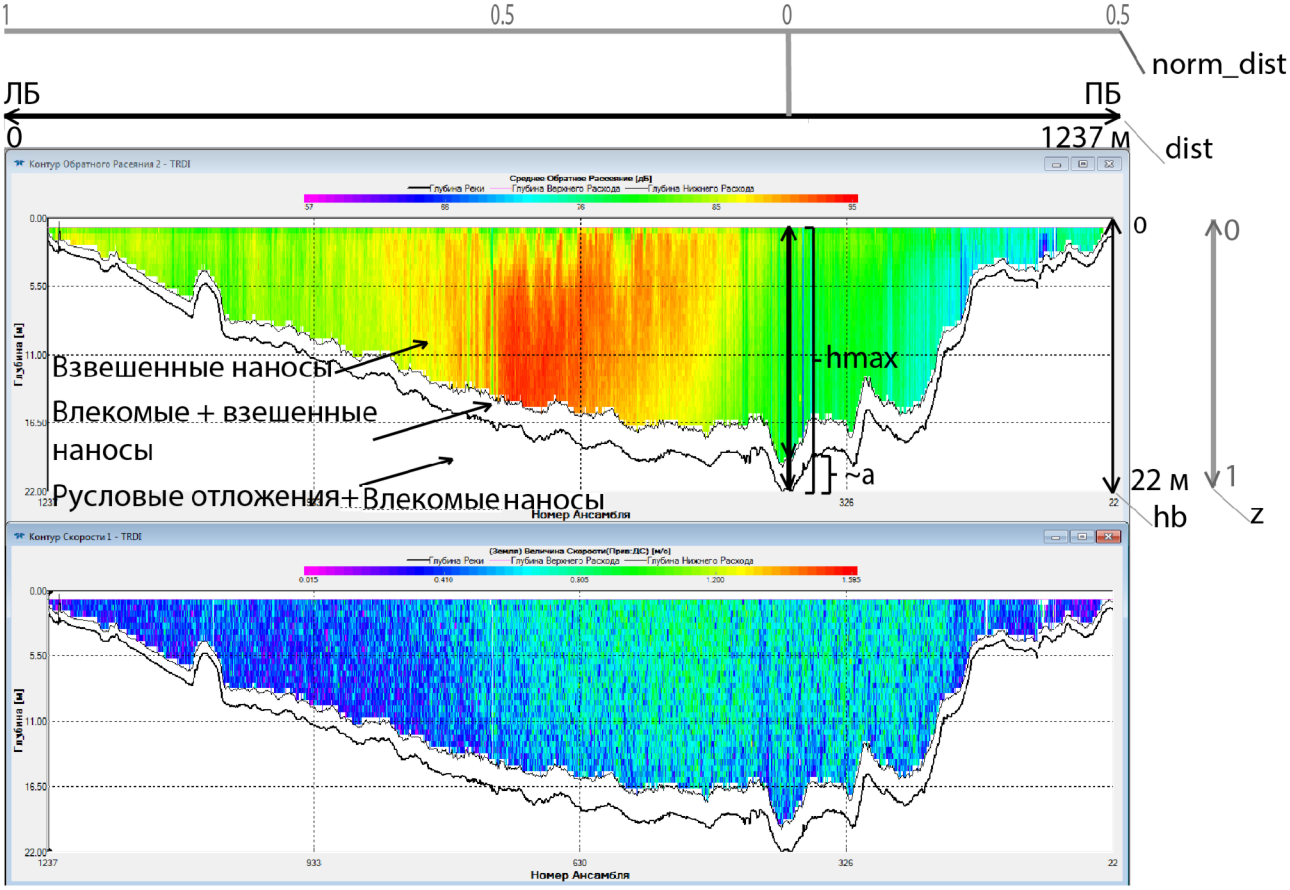



**Рисунок 2.** Основные гидрометрические метрики для поперечного профиля реки Обь в городском поселке Салехард 12.06.2018.

**Figure 2.** Main hydraulic and morphometric characteristics of cross-section of the Ob River in Salekhard 12.06.2018.

происходит движение наносов в виде взвеси. Экстраполяция значений мутности в данную область не производилась во избежание крупных просчетов. Слой неизменяемых значений у дна составляет обычно около 10% площади поперечного сечения, а сама величина *a* зависит от глубины и составляет около 10% от глубины вертикали.

По данным измерений МГУ за период с 2018 по 2019 год для рек Обь и Енисей была получена зависимость (6) между обратным рассеянием АДПТ RiverRay 600kHz и значением весовой мутности в тех же точках поперечного профиля при совместных измерениях. Данные измерений на реке Обь, основного русла реки Енисей и протоки Игарской за разные сезоны были объединены для создания более устойчивой зависимости и покрытия наибольшего интервала значений. В данной ситуации автор не видит противоречий в создании единой зависимости для обеих рек, так как современные исследования свидетельствуют о том, что местные условия, такие как цветность воды, скорость течения, имеют ограниченное влияние на данную характеристику [Deines, 1999], а все измерения концентраций наносов и расходов воды проводились теми же приборами по аналогичной методике. Но тем не менее стоит отметить, что зависимость (6) все-таки носит характер регионального обобщения в рамках больших рек Обь и Енисей, чей диапазон средней скорости течения составляет 0,46–1,82 м/с, обратное рассеяние 65,9–84 ДБ/м, средний диаметр взвеси 0,06–0,22 мм. Корреляция данной зависимости достаточно высокая, 0,7, а коэффициент детерминации равен 0,53.

$$SSC_{ADCP} = 10^{(0{,}914+0{,}014S_v)} \quad (6)$$

где $SSC_{ADCP}$ – мутность в ячейке АДПТ;
$S_v$ – обратное рассеяние.

***Выведение эмпирической зависимости распределения мутности по глубине***

Разнообразие функций распределения мутности во многом заложено в изменчивости числа Рауза между вертикалями. В свою очередь число Рауза является гидравлическим показателем, характеризующим взвесенесущий поток в целом. Данный показатель, являясь показателем степени при значении относительной глубины *z* определяет скорость роста мутности ко дну (рисунок 3). Физический смысл данного показателя состоит в соотношении подъемных сил, действующих на частицы в потоке, связанных с динамическим напором и турбулентность потока, и силы тяжести. Исходя из данных положений, имеет смысл рассматривать изменчивость мутности в трех масштабах (рисунок 3). Безразмерное «измеренное» число Рауза в некотором роде может помочь унифицировать влияние этих факторов на форму кривой вертикального распределения мутности и избежать большого числа предикторов.

На первом (I) уровне среднее число Рауза поперечного профиля реки предлагается рассматривать как функцию гидравлических и гидрометрических параметров потока, что отражает гипотезу о том, что распределение мутности внутри поперечного профиля отражает эмерджентные характеристики потока. Так, форма кривой вертикального распределения мутности может зависеть, например, от расхода воды, средней мутности потока, средней скорости потока, гранулометрического состава взвеси и прочих характеристик реки в конкретном гидрометрическом створе.

Второй уровень масштабирования (II) характеризирует влияние локальных условий конкретной вертикали на распределение мутности. Предикторами в данном случае могут выступать глубина вертикали, ее близость к стрежню, средняя мутность на вертикали. В данном исследовании, влияние локальных факторов будет учитываться в совокупности с первым уровнем масштабирования (I), как коэффициент приведения $\alpha_i$ перед «средним значением числа Рауза для поперечного профиля» *Ro*. Другими словами, значение числа Рауза на вертикали будет рассчитано как произведение среднего значения числа Рауза *Ro* на поперечном профиле и коэффициента приведения $\alpha_i$ для каждой *i* вертикали.

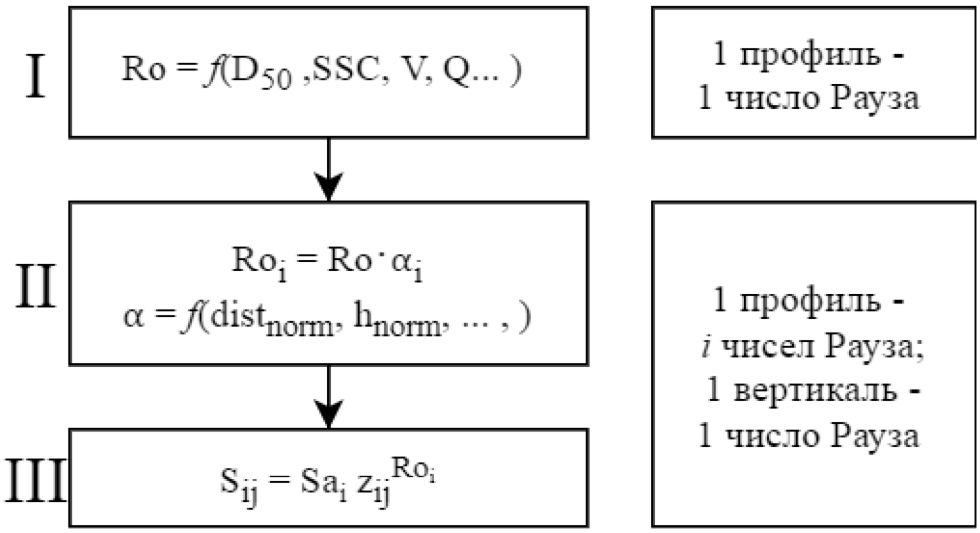



**Рисунок 3.** Схема исследования распределения взвеси по поперечному профилю.

**Figure 3.** Flowchart of the study of suspended sediment distribution.

Примечание: *Ro* – среднее число Рауза для поперечного профиля реки; $D_{50}$ – средний диаметр взвеси по профилю; *SSC* – среднее значение мутности профиля; *V* – средняя скорость реки в конкретном гидрометрическом створе; *Q* – расход воды; $\alpha_i$ – переходный коэффициент при среднем значении числа Рауза для вертикали; $z_{ij}$ – относительная глубина j на вертикали (ансамбле) i; $dist_{norm}$ – относительное расстояние от стрежня; $h_{norm}$ – относительная глубина.

На третьем уровне (III) для разрешения вопроса о различных диапазонах значения мутности у каждой вертикали необходим ввод переменной для стандартизации значений мутности. Такой переменной служит придонное значение мутности на глубине *a* по каждой вертикали. В случае данного исследования будет применен тот же прием, что и в статье [Rouse, 1936]. Это кроме преемственности формул может быть обосновано тем, что именно мутность у дна, в отличие поверхностных и средних значений, имеет неравномерное распределение по поперечному профилю реки, что отчасти также является предиктором вертикального распределения мутности.

## Результаты

### *Моделирование среднего числа Рауза по поперечному профилю*

В данном исследовании поиск значения числа Рауза был произведен численно, опираясь на измеренные данные мутности, полученные из данных измерений обратного рассеяния с помощью АДТП. Такое значение числа Рауза принято называть «измеренным». Средствами машинного обучения – методом линейной регрессии отдельно для каждого профиля и вертикали – значение числа Рауза было рассчитано как свободный коэффициент в зависимости (7). Для данной, и для всех последующих задач машинного обучения, был задействован язык программирования R, который уже в базовой сборке имеет функцию *lm()*. Решение задачи поиска значения числа Рауза как свободного коэффициента в зависимости (7) в функции *lm()* реализовано методом наименьших квадратов. Подразумевая возможность нелинейности связи между средним значением числа Рауза и морфометрическими факторами над всеми предикторами, было выполнено действие возведение в квадрат, куб, а также все возможные комбинации сумм между ними.

$$Ro_i = f(\log_z \frac{S}{S_a}) \quad (7)$$

Таким образом, было получено 40 079 значений чисел Рауза. Основная часть чисел Рауза лежит в диапазоне от 0 до 5. Исключительно для понимания диапазона полученных значений была выполнена визуализация средних значений чисел Рауза вертикали по относительному расстоянию от стрежня (рисунок 4).

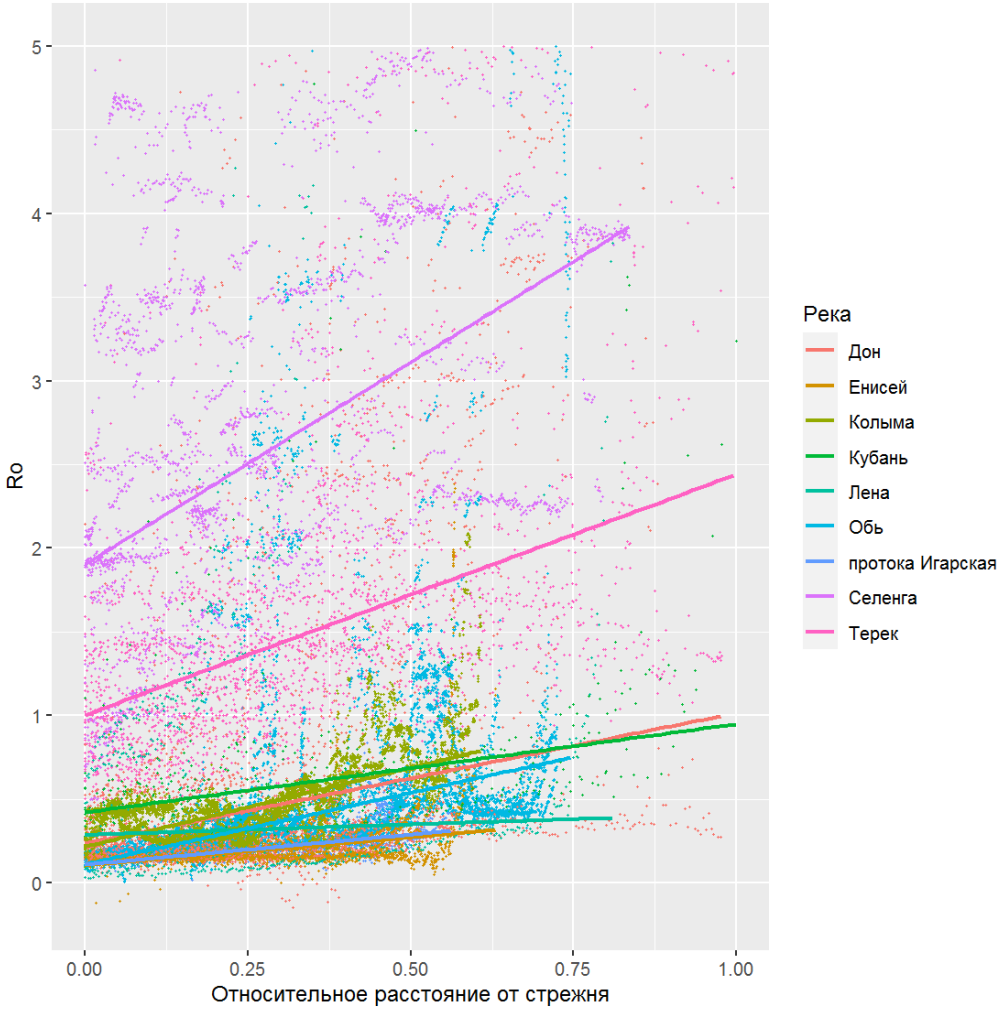



**Рисунок 4.** Распределение числа Рауза для вертикалей изучаемых рек по данным ADCP в зависимости от относительного расстояния от стрежня.

**Figure 4.** Distribution of the Rouse number for the verticals of the studied rivers according to ADCP data, depending on the relative distance from the midstream.

Для поиска наиболее важных предикторов среднего числа Рауза (8), на первом уровне масштабирования была составлена корреляционная матрица для 26 профилей, для которых имеются данные о гранулометрическом составе взвеси (рисунок 5). Из данной коррелограммы видно, что многие гидрометрические параметры тесно скоррелированы между собой и имеют хорошую корреляцию со средним числом Рауза ($r$>0,6). Наиболее сильными предикторами для числа Рауза являются средняя мутность поперечного профиля ($r$=0,9) и доля глины PM1 ($r$=0,8). Формулы, составленные методом регрессии, имеющие ($r$>0,8) представлены в Таблице 2.

$$\mathrm{Ro} = \sum Ro_i \qquad (8)$$

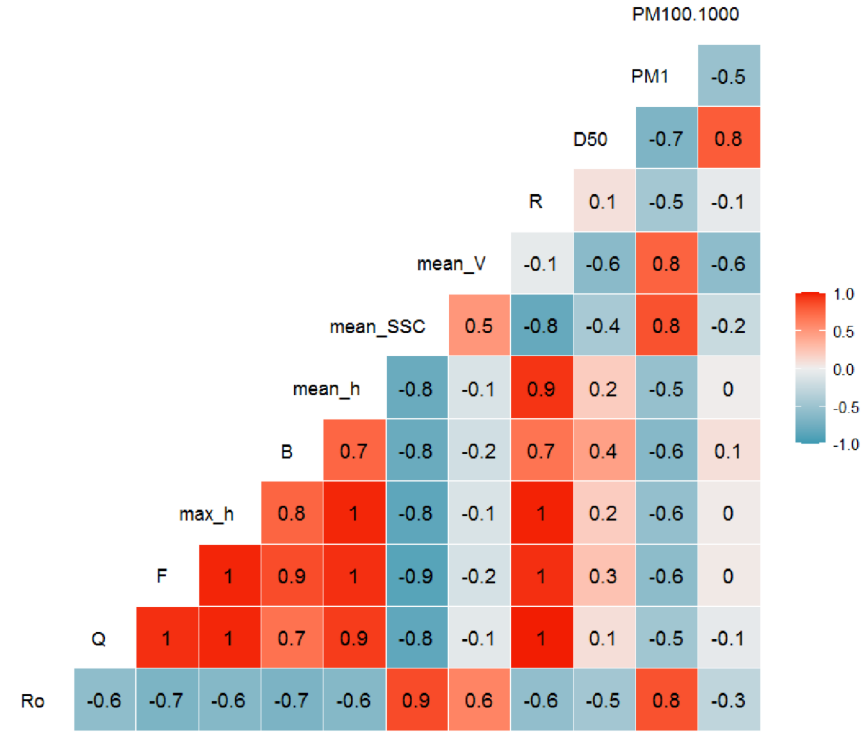



**Рисунок 5.** Корреляционная матрица для гидрометрических параметров профилей.

**Figure 5.** Correlation matrix for hydrometric parameters of cross-sections.

Примечание: *Ro* – число Рауза; *Q* – расход воды; *F* – площадь сечения; *max_h* – максимальная глубина; B – ширина реки; *mean_h* – средняя глубина; *mean_SSC* – средняя мутность; *mean_V* – средняя скорость потока; *R* – расход наносов, *D50* – средний диаметр взвеси; содержание частиц определенного диаметра по [Караушев, 1977] глины PM1 ($d$<0,001 мм), песка PM100-1000 0,1<d<1 мм).

**Таблица 2.** Уравнения регрессии для предсказания среднего числа Рауза профиля.

**Table 2.** Regression equations for predicting the average Rouse number of cross-section.

| **Название модели** | **Уравнение** | ***r**** |
|---|---|---|
| Модель 1 | Ro=1,132+0,002·PM1² | 0,81 |
| Модель 2 | Ro=0,572+0,097·PM1 | 0,84 |
| Модель 3 | Ro=0,515+0,094·(PM1+*mean_v*) | 0,81 |
| Модель 4 | Ro=0,395+0,0000005·*mean_SSC*³ | 0,91 |
| Модель 5 | Ro=-0,172+0,0001·(*mean_SSC*²+PM1) | 0,87 |
| Модель 6 | Ro=-0,173+0,0001·(*mean_SSC*²+*mean_v*) | 0,85 |
| Модель 7 | Ro=-0,173+0,0001·*mean_SSC*² | 0,91 |
| Модель 8 | Ro=0,912+0,002·(*mean_SSC*+PM1²) | 0,82 |
| Модель 9 | Ro=-1,130+0,022·(*mean_SSC*+PM1) | 0,86 |
| Модель 10 | Ro=-1,143+0,022·(*mean_SSC*+PM1+*mean_v*) | 0,82 |
| Модель 11 | Ro=-1,364+0,026·(*mean_SSC*+*mean_v*) | 0,83 |
| Модель 12 | Ro=-1,345+0,027·*mean_SSC* | 0,86 |
| Модель 13 | Ro=1,132+0,002·(PM1²+D50) | 0,80 |

* Коэффициент корреляции между средним значением числа Рауза для профиля и полученным по моделям, указанных в первых двух столбцах.

***Моделирование локальных значений числа Рауза для отдельных вертикалей***

Для моделирования неоднородности транспорта наносов в пределах конкретных поперечных профилей рек и вертикального распределения взвеси на вертикали, был выполнен расчет коэффициента приведения $\alpha_i$ при среднем числе Рауза для поперечного профиля (как второй уровень масштабирования):

$$S_{ij} = Sa_i \, z_{ij}^{\alpha_i \cdot Ro} \quad (9)$$

$$\alpha_i = \frac{Ro_i}{Ro} \quad (10)$$

где $S_{ij}$ – мутность в точке $ij$;

$i$ – вертикаль (ансамбль);

$j$ – точка с известной глубиной на вертикале $i$;

$Sa_i$ – максимальная мутность на вертикали $i$;

$\alpha_i$ – уточняющий коэффициент при числе Рауза, зависящий от параметров вертикали $i$;

$Ro$ – среднее число Рауза для поперечного профиля реки;

$Ro_i$ – число Рауза для вертикали $i$.

Для $\alpha_i$ также была составлена коррелограмма морфометрических факторов вертикалей (рисунок 6). По данному графику можно сказать, что коэффициент корреляции $\alpha_i$ с *norm_dist* положительный (0,3), а с параметрами глубины вертикали – отрицательный (-0,3, -0,4, -0,5) по (*h, h_norm_max, h_norm_mean*) соответственно. Иными словами, прибрежным зонам, в целом, характерен более крутой вид профилей мутности и, соответственно, более высокие градиенты роста мутности ко дну.

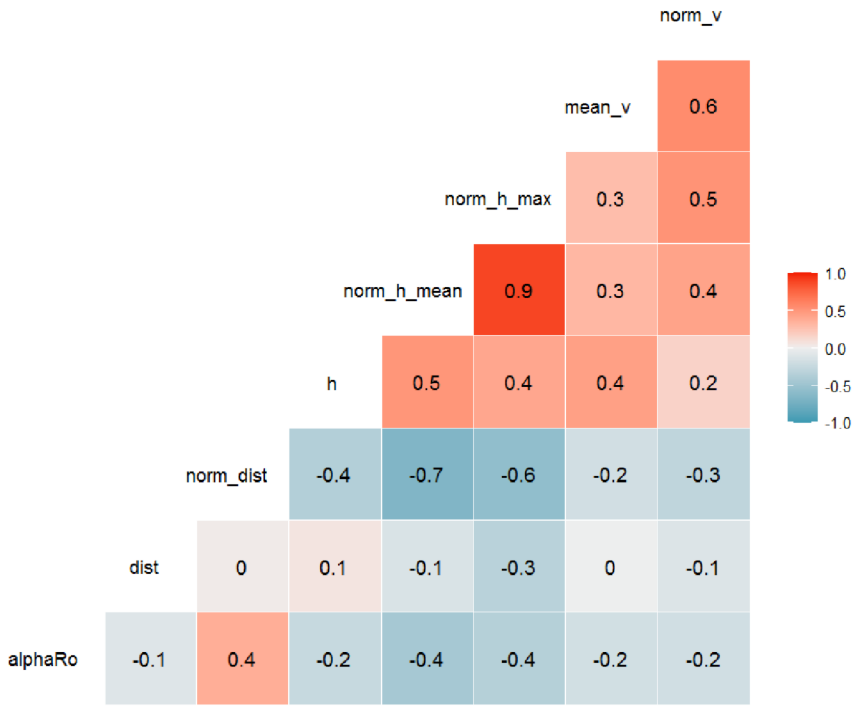



**Рисунок 6.** Корреляционная матрица для гидрометрических параметров вертикалей и коэффициента приведения для среднего числа Рауза α.

**Figure 6.** Correlation matrix for hydrometric parameters of verticals and reduction coefficient for the average Rouse number α.

Примечание: *norm_dist* – относительное расстояние от стрежня; *h* – глубина вертикали; *norm_h_mean* – стандартизированная по среднему максимальная глубина профиля; *norm_h_max* – стандартизированная по среднему максимальная глубина профиля; *mean_v* – средняя скорость течения на вертикали; *norm_v* – относительная скорость.

**Таблица 3.** Уравнения регрессии для оценки уточняющего коэффициента при числе Рауза α.
**Table 3.** Regression equations for predicting the reduction coefficient for the average Rouse number α.

| **Название модели** | **Уравнение** |
|---|---|
| Модель 1 | α=2,486-1,129·(*norm_h_mean*+*norm_v*) |
| Модель 2 | α=2,236-0,882·(*norm_h_mean*+*norm_h_max*) |
| Модель 3 | α=2,241-1,407·*norm_h_mean* |
| Модель 4 | α=2,066-2,058·*norm_h_max* |
| Модель 5 | α=0,599+3,229·*norm_dist*² |
| Модель 6 | α=0,293+2,426·*norm_dist* |

По данным регрессионного анализа были получены расчетные формулы, лучшие из которых с показателем ($r$>0,39) представлены в таблице 3. Свободные коэффициенты были определены методом наименьших квадратов. В качестве предикторов использовались квадраты, кубы и суммы гидрометрических параметров вертикалей. Наибольшую корреляцию по сравнению с рассчитанными значениями α имеет Модель 3, зависимости α от стандартизированной по среднему максимальной глубины профиля *norm_h_mean* (4) ($r$=-0,48).

## Обсуждение результатов

На последнем этапе расчетов были выполнены преобразования, позволяющие объединить формулы, полученные для обоих исследовательских масштабов. Были задействованы 13 уравнений для среднего числа Рауза по профилю с коэффициентом корреляции с измеренными значениями более 0,8 (таблица 2) и 6 уравнений коэффициента приведения к вертикалям с коэффициентом корреляции более 0,39 (таблица 3). Полученные 78 возможных комбинаций рассмотрены далее как самостоятельные расчетные модели. Отбор лучших восьми моделей (таблица 4) был выполнен исходя из следующего принципа: отдельно для каждого профиля был рассчитан коэффициент корреляции между измеренными и рассчитанными значениями по всем моделям, далее для каждого поперечного профиля была выбрана лучшая модель по данной статистике. Так, из всех моделей восемь являются лучшими по показателю коэффициента корреляции между измеренными и смоделированными значениями хотя бы для одного профиля. Можно сказать, что использование полученных формул наиболее рационально было бы производить в ансамбле, иначе говоря, необходимо производить моделирование по восьми моделям, после чего вычислять среднее значение.

Большая часть из отобранных моделей относятся к тем, что используют в качестве предиктора для уточняющего коэффициента при числе Рауза *norm_h_max* (42, 43, 44, 47, 51, 52), или используют сумму *norm_h_max* и *norm_h_mean* (19, 20). Реки Дон и Кубань хуже остальных поддались моделированию, коэффициенты корреляции между измеренными значениями составили 0,35–0,4. Возможно, это связано с тем, что данные о гранулометрическом составе взвеси получены здесь только по пробам, отобранным с поверхности, что не является репрезентативным для поперечных профилей. Для всех остальных рек коэффициент корреляции превышает 0,7. Для реки Обь наиболее подходящими оказались модели 19 и 20, с очень высокими коэффициентами корреляции более 0,89. Для реки Енисей лучше всего оказалась модель 44, в которой для среднего числа Рауза в качестве предикторов участвуют, PM1 и средняя мутность по профилю, – коэффициент корреляции близок к 1. Для большей части профилей по реке Селенга (для шести из девяти измерений) наиболее подходящим оказалось уравнение 43: кубическая зависимость числа Рауза от средней мутности профиля, а также вариации со средней мутностью и PM1. Для всех профилей реки Терек наиболее подходящая зависимость – 52, где распределение мутности по вертикали полностью увязано с факторами гранулометрического состава взвеси: PM1 и средний диаметр.

**Таблица 4.** Итоговые формулы для расчета концентрации взвеси в точке z.
**Table 4.** Final models for suspended sediments concentration on depth z.

| № | Модель |
|---|---|
| 19 | $S=Sa\cdot z^{((2,236-0,882\cdot(norm_h_mean+norm_h_max))\cdot(-0,173+0,0001\cdot(mean_SSC^2+mean_v)))}$ |
| 20 | $S=Sa\cdot z^{((2,236-0,882\cdot(norm_h_mean+norm_h_max))\cdot(-0,173+0,0001\cdot mean_SSC^2))}$ |
| 42 | $S=Sa\cdot z^{((2,066-2,058\cdot norm_h_max)\cdot(0,515+0,094\cdot(PM1+mean_v)))}$ |
| 43 | $S=Sa\cdot z^{((2,066-2,058\cdot norm_h_max)\cdot(0,395+0,0000005\cdot(mean_SSC^3)))}$ |
| 44 | $S=Sa\cdot z^{((2,066-2,058\cdot norm_h_max)\cdot(-0,173+0,0001\cdot(mean_SSC^2+PM1)))}$ |
| 47 | $S=Sa\cdot z^{((2,066-2,058\cdot norm_h_max)\cdot(0,912+0,002\cdot(mean_SSC+PM1^2)))}$ |
| 51 | $S=Sa\cdot z^{((2,066-2,058\cdot(norm_h_max))\cdot(-1,345+0,027\cdot mean_SSC)))}$ |
| 52 | $S=Sa\cdot z^{((2,066-2,058\cdot norm_h_max\cdot(1,132+0,002\cdot(PM1^2+D50`)))}$ |

## Заключение

В работе обсуждались вопросы распределения мутности по поперечному сечению больших рек, основываясь на данных косвенных измерений мутности с помощью АДПТ RiverRay 600 kHz. Использованные измерения МГУ в период с 2018 по 2021 год на 8 реках (Обь, Енисей, Колыма, Селенга, Дон, Кубань, Терек, Лена) позволили собрать базу данных из 78 поперечных профилей, всего 601 196 точек с определенной величиной обратного рассеяния, пересчитанной в мутность воды, и совмещенных с морфометрическими и гидравлическими параметрами русла и потока. Для обработки данных измерений АДПТ, заключающееся в считывании файлов, расчетом гидродинамических и морфометрических характеристик профилей (в том числе чисел Рауза для вертикалей), создании моделей вертикального распределения мутности на базе машинного обучения (линейной регрессии) и визуализации результатов было разработано программное обеспечение на базе языка *R*. Так, в работе была обоснована и апробирована схема расчета числа Рауза, рассматриваемого в качестве гидравлического критерия формирования профилей мутности, на численном анализе данных АДПТ в трех масштабах.

Предложены модели расчета осредненных по поперечному сечению чисел Рауза, в основе которых стоят уравнения линейной регрессии от средней мутности вертикали, гранулометрического состава и скорости для 24 поперечных профилей больших рек. Было получено 13 уравнений для моделирования среднего числа Рауза для поперечного профиля с коэффициентом корреляции более 0,8 по отношению к измеренным значениям числа Рауза. На втором масштабном уровне были рассмотрены модели отклонений частных чисел Рауза от его осредненных значений для поперечных сечений рек в виде коэффициентов приведения при среднем числе Рауза по поперечному профилю. Методом машинного обучения были получены 6 регрессионных моделей с коэффициентом корреляции более 0,39.

Получено 78 моделей вертикального распределения мутности на основе уравнения Рауза-Великанова, из которых 8 имели коэффициент корреляции к измеренным значениям более 0,9. В данные модели была заложена 3-х ступенчатая методика, где в каждой модели изначально происходит расчет среднего числа Рауза для поперечного профиля, а затем происходит уточнение числа Рауза для конкретной вертикали через введение коэффициента приведения – функции глубины вертикали.

## Благодарности

Полевые работы и обработка данных по реке Лена выполнены за счет проекта РНФ 21-17-00181. Разработка моделей выполнена в рамках Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета ("ПРИОРИТЕТ-2030").

## Литература

*Карауше́в А.В.* Теория и методы расчета речных наносов. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1977. 271 с.

*Agrawal Y.C., Hanes D.M.* The implications of laser-diffraction measurements of sediment size distributions in a river to the potential use of acoustic backscatter for sediment measurements // Water Resources Research. 2015. Т. 51. № 11. С. 8854–8867. DOI: 10.1002/2015WR017268.

*Aleixo R., Guerrero M., Nones M., Ruther N.* Applying ADCPs for Long-Term Monitoring of SSC in Rivers // Water Resources Research. 2020. Т. 56. № 1. e2019WR026087. DOI: 10.1029/2019WR026087.

*Deines K.L.* Backscatter estimation using broadband acoustic Doppler current profilers // Proceedings of the IEEE Sixth Working Conference on Current Measurement (Cat. No.99CH36331) (San Diego, CA, USA, 13 March 1999). San Diego, 1999. С. 249–253. DOI**:** 10.1109/CCM.1999.755249.

*Dominguez Ruben L.G., Szupiany R.N., Latosinski F.G., López Weibel C., Wood M., Boldt J.* Acoustic Sediment Estimation Toolbox (ASET): A software package for calibrating and processing TRDI ADCP data to compute suspended-sediment transport in sandy rivers // Computers & Geosciences. 2020. Т. 140. DOI: 10.1016/j.cageo.2020.104499.

*Elçi Ş., Aydın R., Work P.A.* Estimation of suspended sediment concentration in rivers using acoustic methods // Environmental Monitoring and Assessment. 2009. Т. 159. 255. DOI: 10.1007/s10661-008-0627-5.

*Guerrero M., Di Federico V.* Suspended sediment assessment by combining sound attenuation and backscatter measurements – analytical method and experimental validation // Advances in Water Resources. 2018. Т. 113. С. 167–179. DOI: 10.1016/j.advwatres.2018.01.020.

*Hackney C.R., Darby S.E., Parsons D.R., Leyland J., Aalto R., Nicholas A.P., Best J.L.* The influence of flow discharge variations on the morphodynamics of a diffluence-confluence unit on a large river // Earth Surface Processes and

## References

Agrawal Y.C., Hanes D.M. The implications of laser-diffraction measurements of sediment size distributions in a river to the potential use of acoustic backscatter for sediment measurements. *Water Resources Research*, 2015, vol. 51, iss. 11, pp. 8854–8867. DOI: 10.1002/2015WR017268.

Aleixo R., Guerrero M., Nones M., Ruther N. Applying ADCPs for Long-Term Monitoring of SSC in Rivers. *Water Resources Research*, 2020, vol. 56, iss. 1, e2019WR026087. DOI: 10.1029/2019WR026087.

Deines K.L. Backscatter estimation using broadband acoustic Doppler current profilers. *Proceedings of the IEEE Sixth Working Conference on Current Measurement (Cat. No.99CH36331) (San Diego, CA, USA, 13 March 1999)*. San Diego, 1999, pp. 249–253. DOI: 10.1109/CCM.1999.755249.

Dominguez Ruben L.G., Szupiany R.N., Latosinski F.G., López Weibel C., Wood M., Boldt J. Acoustic Sediment Estimation Toolbox (ASET): A software package for calibrating and processing TRDI ADCP data to compute suspended-sediment transport in sandy rivers. *Computers & Geosciences*, 2020, vol. 140. DOI: 10.1016/j.cageo.2020.104499.

Elçi Ş., Aydın R., Work P.A. Estimation of suspended sediment concentration in rivers using acoustic methods. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, vol. 159, 255. DOI: 10.1007/s10661-008-0627-5.

Guerrero M., Di Federico V. Suspended sediment assessment by combining sound attenuation and backscatter measurements – analytical method and experimental validation. *Advances in Water Resources*, 2018, vol. 113, pp. 167–179. DOI: 10.1016/j.advwatres.2018.01.020.

Hackney C.R., Darby S.E., Parsons D.R., Leyland J., Aalto R., Nicholas A.P., Best J.L. The influence of flow discharge variations on the morphodynamics of a diffluence-confluence unit on a large river. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2018, vol. 43, iss. 2, pp. 349–362. DOI: 10.1002/esp.4204.

Landforms. 2018. T. 43. № 2. C. 349–362. DOI: 10.1002/esp.4204.

*Hanes D.M.* On the possibility of single-frequency acoustic measurement of sand and clay concentrations in uniform suspensions // Continental Shelf Research. 2012. T. 46. C. 64–66. DOI: 10.1016/j.csr.2011.10.008.

*Holdaway G.P., Thorne P.D., Flatt D., Jones S.E., Prandle D.* Comparison between ADCP and transmissometer measurements of suspended sediment concentration // Continental Shelf Research. 1999. T. 19. № 3. C. 421–441. DOI: 10.1016/S0278-4343(98)00097-1.

*Latosinski F.G., Szupiany R.N., García C.M. Guerrero M., Amsler M.L.* Estimation of concentration and load of suspended bed sediment in a large river by means of acoustic doppler technology // Journal of Hydraulic Engineering. 2014. T. 140. № 7. C. 04014023. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000859.

*Moore S.A., Coz J.L., Hurther D., Paquier A.* Using multi-frequency acoustic attenuation to monitor grain size and concentration of suspended sediment in rivers // The Journal of the Acoustical Society of America. 2013. T. 133. № 4. C. 1959. DOI: 10.1121/1.4792645.

*Mueller D.S., Wagner C.R., Rehmel M.S., Oberg K.A, Rainville F.* Measuring discharge with acoustic Doppler current profilers from a moving boat (ver. 2.0, December 2013) / U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 3, chap. A22, 2013. 95 c. DOI: 10.3133/tm3A22.

*Mullison J.* Backscatter estimation using broadband acoustic doppler current profilers // Hydraulic Measurements & Experimental Methods Conference (Durham, USA, 2017, July 9–12). Durham, 2017. C. 1–6.

*Pomázi F., Baranya S.* Comparative assessment of fluvial suspended sediment concentration analysis methods // Water (Switzerland). 2020. T. 12. № 3. C. 873. DOI: 10.3390/w12030873.

*Rouse H.B.* Modern conceptions of the mechanics or fluid turbulence. American Society of Civil Engineers, 1936.

Hanes D.M. On the possibility of single-frequency acoustic measurement of sand and clay concentrations in uniform suspensions. *Continental Shelf Research*, 2012, vol. 46, pp. 64–66. DOI: 10.1016/j.csr.2011.10.008.

Holdaway G.P., Thorne P.D., Flatt D., Jones S.E., Prandle D. Comparison between ADCP and transmissometer measurements of suspended sediment concentration. *Continental Shelf Research*, 1999, vol. 19, iss. 3, pp. 421–441. DOI: 10.1016/S0278-4343(98)00097-1.

Karaushev A.V. *Teoriya i metody rascheta rechnykh nanosov [Theory and methods for calculating river sediments]*. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1977. 271 p. (In Russian).

Latosinski F.G., Szupiany R.N., García C.M. Guerrero M., Amsler M.L. Estimation of concentration and load of suspended bed sediment in a large river by means of acoustic doppler technology. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, vol. 140, iss. 7, 04014023. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000859.

Moore S.A., Coz J.L., Hurther D., Paquier A. Using multi-frequency acoustic attenuation to monitor grain size and concentration of suspended sediment in rivers. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2013, vol. 133, iss. 4, 1959. DOI: 10.1121/1.4792645.

Mueller D.S., Wagner C.R., Rehmel M.S., Oberg K.A, Rainville F. *Measuring discharge with acoustic Doppler current profilers from a moving boat (ver. 2.0, December 2013).* U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 3, chap. A22, 2013. 95 p. DOI: 10.3133/tm3A22.

Mullison J. Backscatter estimation using broadband acoustic doppler current profilers. *Hydraulic Measurements & Experimental Methods Conference (Durham, USA, 2017, July 9–12)*. Durham, 2017, pp. 1–6.

Pomázi F., Baranya S. Comparative assessment of fluvial suspended sediment concentration analysis methods. *Water (Switzerland)*, 2020, vol. 12, iss. 3, 873. DOI: 10.3390/w12030873.

*Sakho I., Dussouillez P., Delanghe D., Hanot B., Raccasi G., Tal M., Sabatier F., Provansal M., Radakovitch O.* Suspended sediment flux at the Rhone River mouth (France) based on ADCP measurements during flood events // Environmental Monitoring and Assessment. 2019. Т. 191. 508. DOI: 10.3390/w12030873.

*Sassi M.G., Hoitink A.J.F., Vermeulen B.* Impact of sound attenuation by suspended sediment on ADCP backscatter calibrations // Water Resources Research. 2012. Т. 48. № 9. DOI: 10.1029/2012WR012008.

*Szupiany R.N., Amsler M.L., Parsons D.R., Best J.L.* Morphology, flow structure, and suspended bed sediment transport at two large braid-bar confluences // Water Resources Research. 2009. Т. 45. № 5. DOI: 10.1029/2008WR007428.

*Szupiany R.N., Weibel C.L., Guerrero M., Latosinski F., Wood M.S., Ruben L.G.D., Oberg K.* Estimating sand concentrations using ADCP-based acoustic inversion in a large fluvial system characterized by bi-modal suspended-sediment distributions // Earth Surface Processes and Landforms. 2019. Т. 44. № 6. С. 1295–1308. DOI: 10.1002/esp.4572.

*Szupiany R.N., Weibel C.L., Latosinski F., Amsler M.L., Domínguez L.V., Guerrero M.* Sediment concentration measurements using ADCPs in a large river: Evaluation of acoustic frequency and grain size // Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics (River Flow 2016) (St Louis, Missouri, USA, July 11–14, 2016). DOI: 10.1201/9781315644479-243.

*Thorne P.D., Hanes D.M.* A review of acoustic measurement of small-scale sediment processes // Continental Shelf Research. 2002. Т. 22. № 4. С. 603–632. DOI: 10.1016/S0278-4343(01)00101-7.

*Thorne P.D., Meral R.* Formulations for the scattering properties of suspended sandy sediments for use in the application of acoustics to sediment transport processes // Continental Shelf Research. 2008. Т. 28. № 2. С. 309–317. DOI: 10.1016/j.csr.2007.08.002.

*Thorne P.D., Vincent D.E., Hardcastle P.J., Rehman S., Pearson N.D.* Measuring suspended sediment concentrations using acoustic backscatter

*Rouse H.B.* Modern conceptions of the mechanics or fluid turbulence. American Society of Civil Engineers, 1936.

Sakho I., Dussouillez P., Delanghe D., Hanot B., Raccasi G., Tal M., Sabatier F., Provansal M., Radakovitch O. Suspended sediment flux at the Rhone River mouth (France) based on ADCP measurements during flood events. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2019, vol. 191, 508. DOI: 10.3390/w12030873.

Sassi M.G., Hoitink A.J.F., Vermeulen B. Impact of sound attenuation by suspended sediment on ADCP backscatter calibrations. *Water Resources Research*, 2012, vol. 48, iss. 9. DOI: 10.1029/2012WR012008.

Szupiany R.N., Amsler M.L., Parsons D.R., Best J.L. Morphology, flow structure, and suspended bed sediment transport at two large braid-bar confluences. *Water Resources Research*, 2009, vol. 45, iss. 5. DOI: 10.1029/2008WR007428.

Szupiany R.N., Weibel C.L., Guerrero M., Latosinski F., Wood M.S., Ruben L.G.D., Oberg K. Estimating sand concentrations using ADCP-based acoustic inversion in a large fluvial system characterized by bi-modal suspended-sediment distributions. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2019, vol. 44, iss. 6, pp. 1295–1308. DOI: 10.1002/esp.4572.

Szupiany R.N., Weibel C.L., Latosinski F., Amsler M.L., Domínguez L.V., Guerrero M. Sediment concentration measurements using ADCPs in a large river: Evaluation of acoustic frequency and grain size. *Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics (River Flow 2016) (St Louis, Missouri, USA, July 11–14, 2016)*. DOI: 10.1201/9781315644479-243.

Thorne P.D., Hanes D.M. A review of acoustic measurement of small-scale sediment processes. *Continental Shelf Research*, 2002, vol. 22, iss. 4, pp. 603–632. DOI: 10.1016/S0278-4343(01)00101-7.

Thorne P.D., Meral R. Formulations for the scattering properties of suspended sandy sediments for use in the application of acoustics to sediment transport processes. *Continental Shelf Research*, 2008, vol. 28, iss. 2, pp. 309–317. DOI: 10.1016/j.csr.2007.08.002.

devices // Marine Geology. 1991. T. 98. № 1. C. 7–16. DOI: 10.1016/0025-3227(91)90031-X.

*Topping D.J., Wright S.A.* Long-term continuous acoustical suspended-sediment measurements in rivers - Theory, application, bias, and error. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey Professional Paper 1823, 2016. 98 p. DOI: 10.3133/pp1823.

*Venditti J.G., Church M., Attard M.E., Haught D.* Use of ADCPs for suspended sediment transport monitoring: An empirical approach // Water Resources Research. 2016. T. 52. № 4. C. 2715–2736. DOI: 10.1002/2015WR017348.

*Wall G.R., Nystrom E.A., Litten S.* Use of an ADCP to compute suspended-sediment discharge in the tidal Hudson River, New York. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2006-5055, 2006. 16 p. DOI: 10.3133/SIR20065055.

Thorne P.D., Vincent D.E., Hardcastle P.J., Rehman S., Pearson N.D. Measuring suspended sediment concentrations using acoustic backscatter devices. *Marine Geology*, 1991, vol. 98, iss. 1, pp. 7–16. DOI: 10.1016/0025-3227(91)90031-X.

Topping D.J., Wright S.A. *Long-term continuous acoustical suspended-sediment measurements in rivers - Theory, application, bias, and error*. Reston, Virginia, U.S. Geological Survey Professional Paper 1823, 2016. 98 p. DOI: 10.3133/pp1823.

Venditti J.G., Church M., Attard M.E., Haught D. Use of ADCPs for suspended sediment transport monitoring: An empirical approach. *Water Resources Research,* 2016, vol. 52, iss. 4, pp. 2715–2736. DOI: 10.1002/2015WR017348.

Wall G.R., Nystrom E.A., Litten S. *Use of an ADCP to compute suspended-sediment discharge in the tidal Hudson River, New York*. Reston, Virginia, U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2006-5055, 2006. 16 p. DOI: 10.3133/SIR20065055.

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

УДК 556.535.6(551.345.1) DOI: 10.34753/HS.2022.4.2.165

## ВЛИЯНИЕ БЕРЕГОВЫХ ЕДОМНЫХ ОБНАЖЕНИЙ НА СТОК НАНОСОВ АРКТИЧЕСКИХ РЕК

С.Р. Чалов[1], В.М. Морейдо[1,2], К.Н. Прокопьева[1], В.А. Ефимов[1]
*[1]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия; [2]Институт водных проблем РАН, г. Москва, Россия*
hydroserg@mail.ru

**Аннотация.** Размыв обнажений многолетнемерзлых пород (едома) в бортах долин крупных рек Арктики рассматривается как важный источник поступления взвешенных наносов и углерода в природные воды рек Лена, Колыма, Яна, Индигирка и далее в Северный ледовитый океан. В ходе экспедиционных исследований ледового комплекса едомы Дуванный Яр – крупнейшего внутриматерикового обнажения многолетнемерзлых пород, расположенного в нижнем течении реки Колыма – в период с 2019 по 2021 год проведены оценки его влияния на сток речных взвешенных наносов. Для оценки дальности распространения шлейфа мутности от ледового комплекса анализировались данные дистанционного зондирования со съемочной системы Landsat за период с 1995 по 2021 год (обработано более 60 снимков за период открытой воды с июня по сентябрь). Для оценки баланса взвешенных наносов использовались натурные измерения мутности, в том числе с использованием акустического доплеровского профилографа течений. Благодаря этим измерениям впервые удалось количественно оценить баланс взвешенных наносов на участке между впадением крупных притоков реки Колыма – рек Омолон и Большой Анюй. Выявлено увеличение

## IMPLICATIONS OF YEDOMA BANK OUTCROPS ON THE ARCTIC RIVERS SEDIMENT RUNOFF

Sergey R. Chalov[1], Vsevolod M. Moreydo[1,2], Kristina N. Prokopeva[1], Vasily A. Efimov[1]
*[1]Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; [2]Institute of Water Problems, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*
hydroserg@mail.ru

**Abstract.** The erosion of permafrost outcrops (yedoma) in the valleys of large Arctic rivers is considered as an important source of suspended sediment and carbon inflow into the natural waters of the Lena, Kolyma, Yana, Indigirka Rivers and further into the Arctic Ocean. In the course of expeditionary studies of the Duvanny Yar Yedoma ice complex, the largest inland outcrop of permafrost, located in the lower reaches of the Kolyma river in 2019–2021 the assessments of its influence on the suspended sediments' runoff were carried out. To analyze the scale of the turbidity plume from the ice complex and suspended sediments' balance on the adjacent river reach we used remote sensing methods, and field measurements of turbidity, including using an acoustic Doppler current profiler. An increase of around 20% in the turbidity of the Kolyma River was revealed during the summer low-flows in the reach downstream of the yedoma. The influx of suspended matter due to the melting of the slopes of the ice complex on hot summer days in the emerging network of turbidity streams was estimated at a value of more than 5 kg/s. The effect of thermal destruction of the ice complex is confirmed by a statistically significant relationship between the length of the turbidity plume propagating from Duvanny Yar Yedoma downstream the Kolyma river and the air

*Чалов С.Р., Морейдо В.М., Прокопьева К.Н., Ефимов В.А.* Влияние береговых едомных обнажений на сток наносов арктических рек // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2022. Т. 4. Вып. 2. С. 165–182. DOI: 10.34753/HS.2022.4.2.165.

мутности воды реки Колыма в пределах 20% в период летней межени на нижерасположенном бесприточном участке. Проведена оценка поступления взвеси за счет таяния склонов ледового комплекса в жаркие летние дни в формирующейся сети мутьевых водотоков – величиной более 5 кг/с. Эффект термического разрушения ледового комплекса подтверждает статистически значимая связь между длиной шлейфа мутности, распространяющегося от едомы Дуванный Яр вниз по течению реки Колыма, с температурой воздуха в этом районе. Таким образом, впервые получены количественные данные, подтверждающие роль активизации разрушения многолетнемерзлых пород в формировании стока наносов.

**Ключевые слова:** сток наносов; многолетнемерзлые отложения; реки арктического побережья России; Дуванный Яр; Колыма; допплеровская расходометрия; русловые процессы.

temperature in this area. Thus, for the first time, quantitative data have been obtained confirming the role of activation of destruction of permafrost in the formation of sediment runoff.

**Keywords:** sediment runoff; permafrost; rivers of the Russian Arctic; Duvanny Yar; Kolyma River; acoustic doppler discharge measurement; river channel processes.

## Введение

Сток арктических рек на протяжении второй половины XX – начала XXI века испытывает существенные воздействия, связанные как с прямой антропогенной нагрузкой на водосбор, так и с глобальными климатическими изменениями [Kulmala et al., 2016; Agafonova et al., 2017]. Среди процессов, влияющих на речной сток в последнее десятилетие, отмечают зарегулирование водохранилищами, организацию и прекращение русловой золотодобычи, снижение добычи строительных материалов из русла и воздействие регионального изменения климата. Согласно различным данным таяние многолетнемерзлых пород является мощным триггером климатических изменений в регионе, также влияющим на сток [Pokrovsky et al., 2015; Chalov et al., 2018].

Учитывая, что гидрологический мониторинг в нижнем течении арктических рек сведен к минимуму и на протяжении нескольких десятков лет на гидрометрических постах Росгидромета не выполнялись измерения расходов воды и наносов, исследования современного состояния водно-эрозионной системы могут быть основаны только на экспедиционных исследованиях. Выполненные в период с 2019 по 2021 год масштабные полевые работы в нижнем течении рек Обь, Енисей, Лена и Колыма в рамках нескольких исследовательских проектов [Магрицкий и др., 2022] позволили собрать уникальный объем данных по гидрологии и гидрогеохимии крупнейших рек Арктики. При этом был произведен сбор данных о влиянии термоэрозионных процессов на участке реки Колыма вдоль крупнейшего внутриматерикового обнажения многолетнемерзлых пород (едомы) Дуванный Яр на поступление твердого вещества в воды реки Колыма (рисунок 1).

Целью настоящей статьи было дать общую информацию о распространении многолетнемерзлых пород и количественно оценить поступление взвешенных веществ в реку Колыма от едомы Дуванный Яр с использованием натурных и дистанционных методик. Для этого были поставлены и решены несколько задач:

— оценить связь между температурой воздуха и интенсивностью поступления твердого материала от едомы Дуванный Яр в воды реки Колыма с использованием дистанционных методов;


Chalov S.R., Moreydo V.M., Prokopeva K.N., Efimov V.A. Implications of yedoma bank outcrops on the arctic rivers sediment runoff. *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2022, vol. 4, iss. 2, pp. 165–182. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2022.4.2.165.

— количественно измерить концентрацию взвешенных наносов на участке выше и ниже едомы Дуванный Яр и провести оценку их баланса;

— оценить распределение взвешенных наносов по поперечному профилю русла реки Колыма на участке едомы Дуванный Яр с помощью гидроакустических методов с использованием акустических доплеровских профилографов течений (далее – АДПТ).

Статья состоит из 4 разделов. В первом разделе приведены сведения о распространении ледовых комплексов на арктических реках России и предыдущих исследованиях на участке едомы Дуванный Яр. Во втором разделе подробно описаны использованные методики. В третьем разделе приведены оценки распространения шлейфа мутности ниже по течению реки Колымы от едомы Дуванный Яр, оценки распределения взвешенных наносов по профилю русла реки Колыма и рассчитан баланс наносов. В заключении обсуждаются полученные результаты и перспективы дальнейших исследований.

## Едомы в низовьях арктических рек России и история исследований едомы Дуванный Яр

Распространение термоэрозионных и термоабразионных берегов вдоль ледовых комплексов (так называемых едом) на севере Сибири в первую очередь связано с побережьем Восточно-Сибирского моря и моря Лаптевых, однако ледовые комплексы широко встречается и в нижнем течении арктических рек. Они описаны в низовьях реки Лена [Кравцова, Инюшин, 2019], Колыма, на реках Малый и Большой Анюй [Васильчук и др., 2018]. Обширные по пространственному охвату термоэрозионные



**Рисунок 1.** Обнажение многолетнемерзлых пород (едомы) Дуванный Яр (фото 2020 года).
**Figure 1.** Permafrost outcrop on the Duvanny Yar yedoma.

берега расположены в дельте реки Лена, где они существенно влияют на баланс наносов [Chalov, Prokopeva, Habel, 2021]. Останцы едомы здесь возвышаются над дельтовыми островами

относительно выровненными поверхностями высотой 35–45 м (до 60 м), с мерзлотным микрорельефом и густой сетью солифлюкционного и эрозионного расчленения. Термоэрозионные берега повсеместно распространены по побережью западной части дельты реки Лена, где береговая линия ограничивает абразионную морскую террасу, а также по выдвигающимся аккумулятивным берегам восточной части дельты с устьями протоков Быковской, Трофимовской, Туматской [Are, 1998]. По результатам обследований экспедицией Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова в 2022 году в дельте реки Лена установлена протяженность обнажений многолетнемерзлых пород по берегам проток Туматской, Оленекской, Булкурской общей длиной до 2 километров.

В то же время крупнейшим внутриматериковым обнажением многолетнемерзлых пород считается ледовый комплекс едомы Дуванный Яр, расположенный в нижнем течении реки Колыма. Изучение разреза ледового комплекса едомы Дуванный Яр (рисунок 2) началось еще в 60-ых годах XX века [Соловьев, 1962; Васьковский, 1963], однако на начальном этапе эти исследования носили описательный характер. С конца 60–70-ых годов вопросы образования крупнейшего обнажения многолетнемерзлых пород обсуждались в ряде работ [Баранова, Бискэ, 1964; Русанов, Бороденкова, Гончаров, 1967; Томирдиаро, 1975]. Впоследствии объект привлек внимание международных групп ученых. Методами радиоуглеродного датирования и спорово-пыльцевого анализа были проведены оценки времени образования отложений Колымской низменности [Васильчук и др., 1987; Zanina et al., 2011]. Были рассмотрены три основные теории процессов и условий образования этой крупнейшей едомы: эоловое [Томирдиаро, 1980; Томирдиаро, Черненький, 1987], аллювиальное [Баранова, Бискэ, 1964; Русанов, Бороденкова, Гончаров, 1967] и полигенетическое [Sher, 1997]. Проверка перечисленных гипотез детально анализировалась в обобщающей работе [Murton et al., 2015], основанной на данных, собранных в ходе полевых экспедиций с 1970 года. Кроме этого, в работах [Каплина, Гитерман, Лахтина, 1978; Шило, Томирдиаро, 1989] подробно рассматривались гранулометрический, минералогический и солевой составы толщи едомы Дуванный Яр. По данным палеопедологического исследования [Губин, 1984] нижний горизонт мощностью 5–10 м состоит в основном из переслаивающихся мелкозернистых и пылеватых песков, характризирующихся высоким содержанием углерода (1,5–2,0%), а верхний сложен алевритами, в которых содержание органического углерода достигает 2,3%.

В отношении взаимодействия с водами реки Колыма роль этого крупнейшего руслового обнажения многолетнемерзлых пород почти не рассматривалась. Исключение составляет исследование [Griffin et al., 2011], основанное на дешифрировании гиперспектральных снимков спутниковых систем Landsat 5 (TM) и Landsat 7 (ETM+), которое выявило пространственную и временну́ю изменчивость концентраций растворенного органического углерода (DOC) в пределах нижнего течения реки Колыма, важнейшую роль в увеличении которой играет рост мутности воды в период половодья. Мониторинговые исследования взвешенного органического углерода (POC), выполненные в рамках проекта ArcticGRO на реках арктической зоны, подтверждают факт генетической принадлежности содержания углерода к выходам многолетнемерзлых пород – едомам, являющимися основным источником образовавшегося в эпоху позднего плейстоцена углерода [McClelland et al., 2016]. В то же время детальных локальных исследований на эту тему не проводилось, соответственно, в отечественной и зарубежной литературе не встречаются оценки изменчивости баланса взвешенных наносов и их микроэлементного состава в речных водах под воздействием таяния многолетнемерзлых пород, слагающих речные берега.

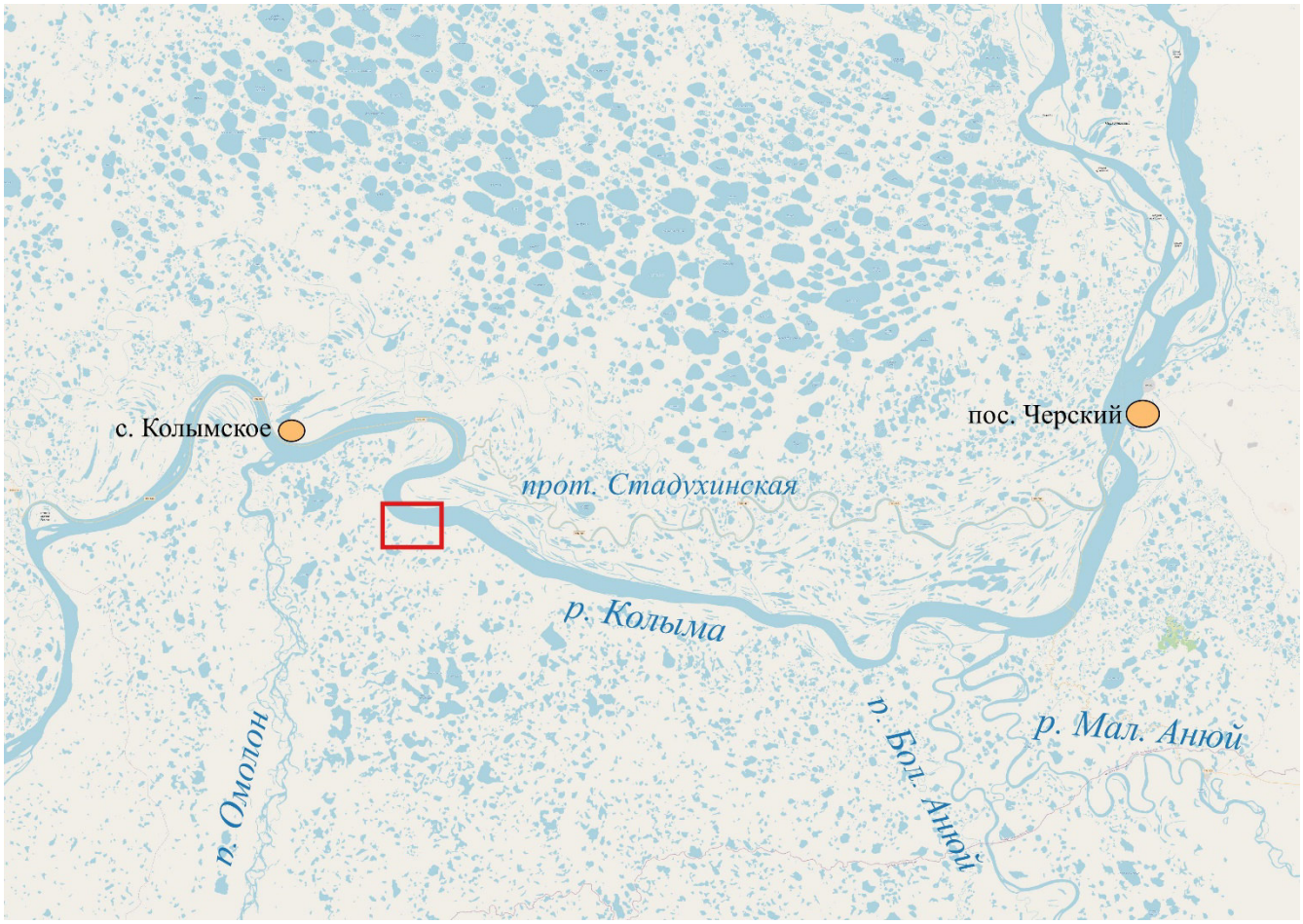



**Рисунок 2.** Схема района исследований.
Красным прямоугольником обозначен район едомы Дуванный Яр.
**Figure 2.** Map of the research area. Red rectangle denotes the location of Duvanny Yar.

## Материалы и методы

Для решения поставленных в исследовании задач были использованы методы, которые можно разделить на три блока:

— дистанционные методы, в которые входило определение интенсивности поступления наносов с едомы Дуванный Яр в воды реки Колыма по данным дистанционного зондирования Земли за многолетний период и влияние на нее изменений температуры окружающего воздуха;

— гравиметрические, которые были основаны на анализе взвешенных частиц в пробах речной воды и направлены на исследование потока химических элементов, в том числе органических, с едомы Дуванный Яр;

— гидроакустические методы, в рамках которых были измерены параметры рассеяния акустического сигнала от взвешенных частиц в речной воде и получены оценки баланса наносов на участке реки Колыма у едомы Дуванный Яр.

### *Метод определения мутности воды по данным дистанционного зондирования*

Применение методов дистанционного зондирования Земли позволяет получить обширные данные о мутности воды. Отклики на видимую световую часть электромагнитного спектра по космическим снимкам в зависимости от концентрации наносов на поверхности воды коррелируют с абсолютными значениями мутности воды за счет рассеяния взвешенных веществ на поверхности воды [Kirk, 1989]. Методика дешифрирования концентрации взвешенных наносов основана на связи значений коэффициента отражения $\rho$ в красном канале видимого спектра и измеренных концентраций взвешенных частиц в полевых условиях [Чалов, Базилова, Тарасов, 2017]. Специальные

исследования по оценке точности зависимостей $S=f(\rho)$ [Чалов и др., 2019] указывают на погрешности в пределах 20%, что является приемлемым для изучения характеристик стока наносов.

Оценка мутности воды реки Колыма в районе едомы Дуванный Яр и ниже по течению проводилась по снимкам со съемочной системы Landsat за период с 1995 по 2021 год (обработано более 60 снимков за период открытой воды с июня по сентябрь), полученных с ресурса EarthExplorer [1]. Снимки подвергались радиометрической коррекции: перевод сырых значений яркости пикселей на снимке в коэффициенты отражения осуществлялся по методу, описанному в работе [Chander, Markham, Helder, 2009]. Атмосферная коррекция выполнена по методу «черного объекта» (DOS1) [Chavez, 1996], которая направлена на исключение влияния дымки, вносящей отклонения в значения яркости [Hadjimitsis et al., 2004].

***Гравиметрический метод определения концентрации взвешенных наносов***

Для определения концентрации взвешенных наносов 8–10 августа 2019 года были отобраны пробы воды реки Колыма на участке выше и ниже едомы Дуванный Яр. Пробы объемом 1–3 л были подвергнуты гравиметрическому анализу, в ходе которого взвешенные частицы отделялись от водного раствора методом фильтрации на вакуумной установке Millipore через мембранные фильтры (Millipore, Владисарт) с диаметром пор 0,45 мкм. Фильтрация проводилась до полного прекращения прохождения воды через фильтр. Фильтры с осадком просушивались (при 105°C в течение 2 часов) для последующего определения мутности воды и гранулометрического состава. Величина весовой мутности (мг/л) определялась с помощью взвешивания сухого фильтра со взвесью на аналитических весах, с вычетом начальной массы чистого фильтра, и деления на объем отфильтрованной воды.

***Оценка баланса наносов на участке***

Для оценки вклада едомы Дуванный Яр в формирование стока наносов реки Колыма исследовался бесприточный участок от устья реки Омолон до устья реки Анюй, на котором и расположена едома. Река здесь имеет преимущественно неразветвленное русло, в верхней части – меандрирующее (рисунок 2). Непосредственно выше едомы Дуванный Яр от основного русла реки Колыма ответвляется левая пойменная протока Стадухинская, которая присоединяется обратно уже ниже слияния рек Колыма и Анюй ближе к поселку Черский.

Для оценки баланса наносов использовались данные, полученные 8–10 августа 2019 года, когда с помощью АДПТ Teledyne RDI RiverRay 3 мГц были выполнены измерения расходов воды и отбор проб на анализ мутности на участке реки Колыма выше, в створе и ниже едомы Дуванный Яр. С учетом полученных измерений расход воды $Q_0$ и наносов $R_0$ реки Колыма ниже слияния с рекой Омолон (створ выше едомы Дуванный Яр) рассчитывался как:

$$Q_0 = Q_{\text{Омолон}} + Q_{\text{Колымское}} - Q_{\text{Стадухинская}} \quad (1)$$

$$R_0 = R_{\text{Омолон}} + R_{\text{Колымское}} - R_{\text{Стадухинская}} \quad (2)$$

Расход воды и наносов реки Колыма выше слияния с рекой Анюй (створ ниже едомы Дуванный Яр) рассчитывался как:

$$Q_0 = Q_{\text{Колыма ниже Анюй}} - Q_{\text{Большой Анюй}} - Q_{\text{Малый Анюй}} \quad (3)$$

$$R_0 = R_{\text{Колыма ниже Анюй}} - R_{\text{Большой Анюй}} - R_{\text{Малый Анюй}} \quad (4)$$

В створе едомы Дуванный Яр проводились натурные измерения, поэтому оценки $Q_0$ и $R_0$ принимались непосредственно по фактическим данным. По измерениям, проведенным в августе 2019 года, водность протоки Стадухинской относительно основного русла составляла 9% от суммарного расхода реки Колыма. Эта величина использовалась в расчетах баланса воды и наносов.

***Гидроакустический метод измерения расходов воды, концентрации взвешенных наносов и их распределения по поперечному профилю сечения русла***

Гидроакустический метод измерения расходов воды основан на оценке скорости течения в единичном объеме воды путем измерения доплеровского сдвига частоты ультразвукового сигнала, излучаемого АДПТ и

[1] EarthExplorer [Электронный ресурс]. URL: http://earthexplorer.usgs.gov.

отраженного от частиц взвеси в этом объеме. Диапазон частот для АДПТ составляет от 300 до 3 000 кГц. Для измерения расхода воды АДПТ монтируется на движущейся лодке и излучает акустические сигналы в толщу воды по направлению ко дну реки. Измеренные сигналы, отраженные от мелких частиц минерального и органического вещества, находящегося в единичном объеме воды, называются интенсивностью обратного рассеяния. Величина этого рассеяния, отраженного от взвешенных частиц, фиксируется прибором на различных глубинах в пределах всей вертикали водной толщи до дна, что позволяет получить вертикальный профиль скорости. Обычно блоки АДПТ имеют от 1 до 9 ультразвуковых излучателей, которые работают в различном диапазоне частот, что позволяет одновременно с измерениями контролировать качество принимаемого сигнала. Кроме того, блоки АДПТ могут быть дополнительно оснащены эхолотами и приемниками GPS-сигнала, которые позволяют проводить измерения в локальной (путем отслеживания перемещения прибора относительно дна реки) или глобальной системе координат. Это позволяет точно измерять скорость течения воды, поскольку скорость движущейся лодки вычитается из измеренной скорости потока. По мере того как лодка движется по реке от одного берега к другому, вертикальные профили плавно объединяются, образуя распределение скорости в поперечном сечении, которая позволяет рассчитать расход воды в створе измерений [Mueller et al., 2013; Морейдо и др., 2020].

При наличии одновременных с измерениями АДПТ определений концентрации взвешенных наносов в створе, возможен переход от значений измеряемой прибором интенсивности обратного рассеяния к величинам весовой мутности или NTU путем построения зависимости вида:

$$SSC_{\text{АДПТ}} = 10^{(\alpha S_t(R) + K_T)} \quad (5)$$

где $SSC_{\text{АДПТ}}$ – концентрация взвешенных наносов;

$\alpha$ – эмпирический коэффициент;

$S_t(R)$ – интенсивность обратного рассеяния АДПТ, дБ;

$K_T$ – параметры, зависящие от модели АДПТ:

$L$ – длина импульса;

$P_T$ – интенсивность исходящего сигнала;

$C$ – линейный размер излучателя АДПТ.

Уравнение (5) представляет собой искомую степенную зависимость мутности от интенсивности полученного сигнала АДПТ. Коэффициенты $\alpha$ и $K_T$ ввиду трудности их определения аналитически, подлежат калибровке. Исследованию зависимостей вида (5) посвящено большое количество работ [Latosinski et al., 2014; Szupiany et al., 2019; Морейдо и др., 2020; Dominguez Ruben et al., 2020], многие из которых указывают на региональную связь параметров зависимости с составом наносов. Для оценки распределения скорости течения и мутности по поперечному сечению реки Колыма были использованы данные, полученные путем измерений АДПТ Teledyne RDI RioGrande WorkHorse 600 кГц 6 июля 2020 года на участке у едомы Дуванный Яр.

## Анализ результатов

### *Распространение шлейфа мутности от едомы Дуванный Яр по руслу Колымы*

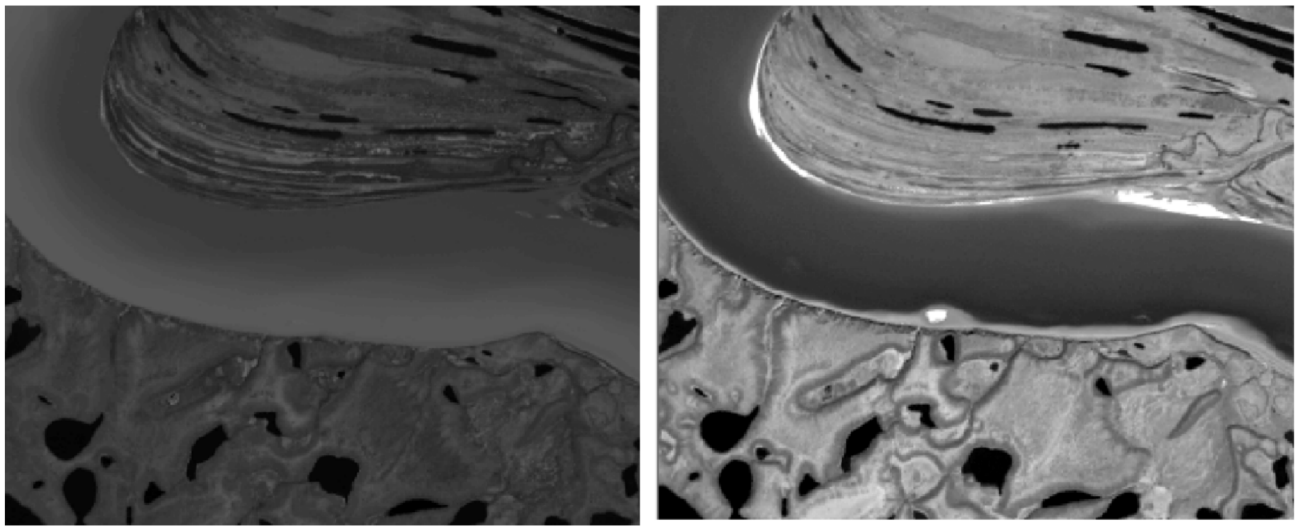
В ходе анализа данных спутниковых снимков Landsat на участок от устья реки Омолон до устья реки Анюй в период с 1995 по 2021 год за период открытого русла (июнь – сентябрь; 61 снимок) было установлено, что едома Дуванный Яр находится в зоне смешения Колымских и Омолонских вод. На образование шлейфа у едомы Дуванный Яр и ниже по течению в период прохождения половодья влияет повышенная водность реки Омолон – в июне – начале июля Омолонские воды более мутные, чем воды реки Колыма. В итоге влияние едомы Дуванный Яр на сток наносов проявляется только в условиях пониженной водности реки Омолон. Шлейф в таких условиях был дешифрирован на 31 снимке из 61 проанализированных.

Расчет длины шлейфа от едомы Дуванный Яр проводился на основе визуального дешифрирования спутниковых снимков Landsat в

красном канале видимого спектра, в котором наблюдаются наибольшие корреляции параметра яркости пикселя (коэффициент отражения) и значений мутности воды. Чем больше значение поверхностного отражения, тем ярче пиксель и тем выше значение мутности воды, что можно увидеть у правого берега реки Колыма у едомы Дуванный Яр (рисунок 3), где на значение яркости пикселя влияет приток наносов, выносимых со склонов едомы. В период пониженной водности слабонасыщенных взвесью вод реки Омолон наиболее очевиден контраст между водами с различным содержанием наносов, что создает основу для надежного дешифрирования. В этот период – с июля по сентябрь – шлейф от едомы Дуванный Яр может прослеживаться на расстоянии от 10 до 70 км вниз по течению у правого берега.

Нами была также исследована связь между температурой воздуха в рассматриваемый период и длиной шлейфа мутности от едомы Дуванный Яр. Для этого были взяты ряды среднесуточных температур воздуха на ближайшей метеостанции в селе Колымское (рисунок 2). Были рассчитаны суммы среднесуточных температур воздуха за период 5, 10, 20 и 30 суток до даты, когда был сделан каждый из снимков в использованном наборе. Был оценен коэффициент корреляции между суммами температур по периодам и длиной дешифрируемого шлейфа со снимка (рисунок 4). Наиболее тесная связь ($r=0,74$, $n=33$) была получена для 20-суточных сумм температур воздуха. При этом за другие периоды суммирования также получены значимые коэффициенты корреляции.

Наличие значимых связей между длиной шлейфа мутности от едомы Дуванный Яр и суммами положительных температур воздуха свидетельствует о вытаивании многолетнемерзлых пород вследствие термических процессов. Можно утверждать, что при повышении средней температуры воздуха



(а) (б)

**Рисунок 3.** Спутниковые снимки Landsat 8 в красном канале видимого спектра (band 4):
а) 18.06.2020; б) 24.08.2021.

**Figure 3.** Landsat 8 satellite images in red band (band 4):
а) 18.06.2020; б) 24.08.2021.

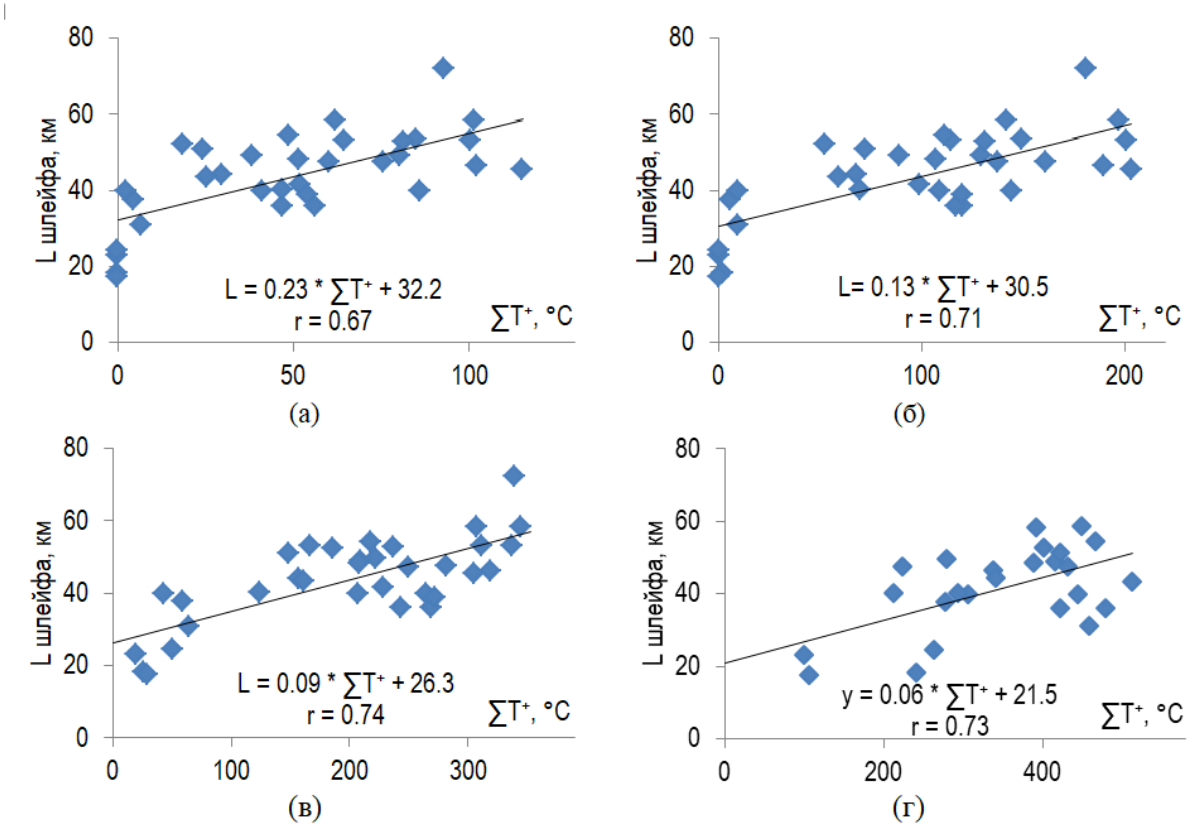



**Рисунок 4.** Линейная связь длины шлейфа ($L_{шлейфа}$, км) и значения сумм положительных температур воздуха ($\sum T^+$, °C) за: а) за 5 дней до даты снимка; б) за 10 дней до даты снимка; в) за 20 дней до даты снимка; г) за 30 дней до даты снимка.

**Figure 4.** Linear regression between the plume length ($L_{шлейфа}$, км) and positive air temperature sums ($\sum T^+$, °C) for a) 5 days prior to image date; b) 10 days prior to image date; c) 20 days prior to image date; d) 30 days prior to image date.

в данном районе увеличится и поступление взвешенных наносов от таящего массива многолетнемерзлых пород. Эти связи полностью подтверждаются натурными наблюдениями, выполненными при обследовании едомы Дуванный Яр в августе 2019 года, июле 2020 года и июне 2021 года. В жаркие дни наблюдается формирование не менее 10 мутьевых водотоков (с концентрацией взвеси более 100 000 мг/л), стекающих со склонов ледового комплекса. Суммарный дебит таких водотоков 27 июня 2021 года оценен нами величиной 10 л/с, что соответствовало поступлению не менее 5 кг/с взвешенных наносов.

***Оценка баланса наносов на участке едомы Дуванный Яр***

Результаты расчетов по уравнениям (1) – (4) показали, что по длине реки Колыма на исследуемом участке происходит монотонное возрастание водности. На этом фоне изменение расхода наносов по длине реки имеет более сложную систему. В верхней части участка, до едомы Дуванный Яр, формируется зона аккумуляции наносов, связанная с подпорной зоной от узла слияния рек Омолон и Колыма и, вероятно, падением скоростей выше излучин у едомы Дуванный Яр. При этом определенную роль может играть перераспределение части стока наносов в протоку Стадухинскую. В результате в меженный период расход наносов на участке от устья реки Омолон до едомы Дуванный Яр снижается примерно на 10%. Ниже по течению, в первую очередь за счет поступления продуктов разрушения едомы Дуванный Яр, согласно данным измерений в русле реки Колыма, происходит увеличение стока наносов почти на 20% по сравнению с расположенным выше участком русла (таблица 1). Прирост стока

наносов на участке превышает величину вклада мутьевых водотоков, приведенную выше (5 кг/с, то есть около 2% от стока наносов реки Колыма, таблица 1), что может быть связано с наличием других факторов поступления материала в реку, а также отличием дат обследования водотоков и измерений в русле реки.

Таким образом, оценка натурных измерений расхода взвешенных наносов на участке едомы Дуванный Яр показывает, что на исследуемом участке реки Колыма происходит увеличение стока наносов почти на 20% по сравнению с условиями выше по течению, частично объясняемая термической эрозией ледового комплекса.

**Таблица 1.** Баланс расходов воды и наносов.
**Table 1.** Streamflow discharge and sediment load balance.

| **Створ** | **Расстояние от устья реки Омолон, км** | **Расход воды** | | **Расход наносов** | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | **$м^3/с$** | **%** | **кг/с** | **%** |
| Выше едомы Дуванный Яр (исток протоки Стадухинская) | 26 | 5 800 | 100,0 | 287 | 100,0 |
| В районе едомы Дуванный Яр | 43 | 5 905 | 101,8 | 259 | 90,2 |
| Ниже едомы Дуванный Яр | 52 | 6 130 | 105,7 | 308 | 107,3 |

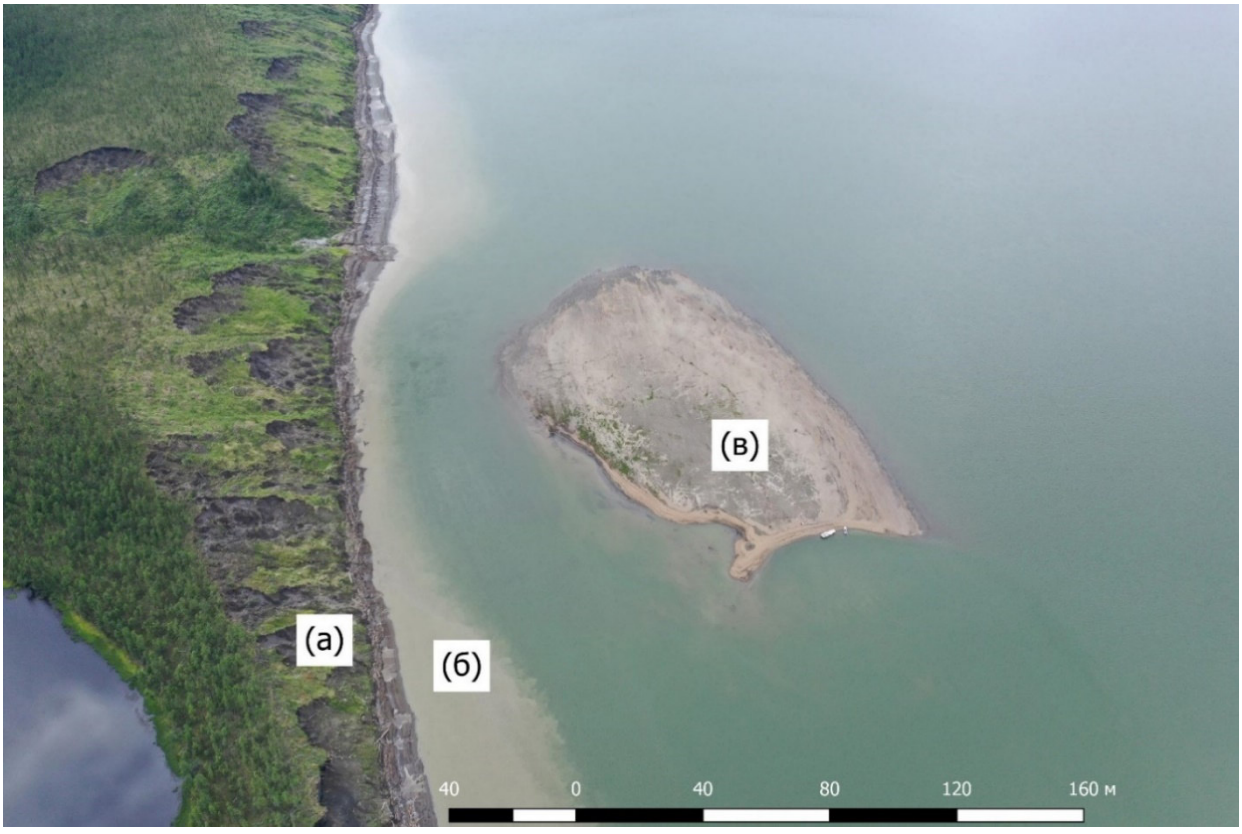



**Рисунок 5.** Вид на участок русла р. Колымы у едомы Дуванный Яр: размываемый берег (а), поток взвешенных наносов с него (б), осередок (в) (фото В.М. Морейдо, с квадрокоптера).
**Figure 5.** Oblique image of the Duvanny Yar edoma eroded bank (a), wash load plume running from it (б) and braid bar (в). Drone photo taken by V.M. Moreido.

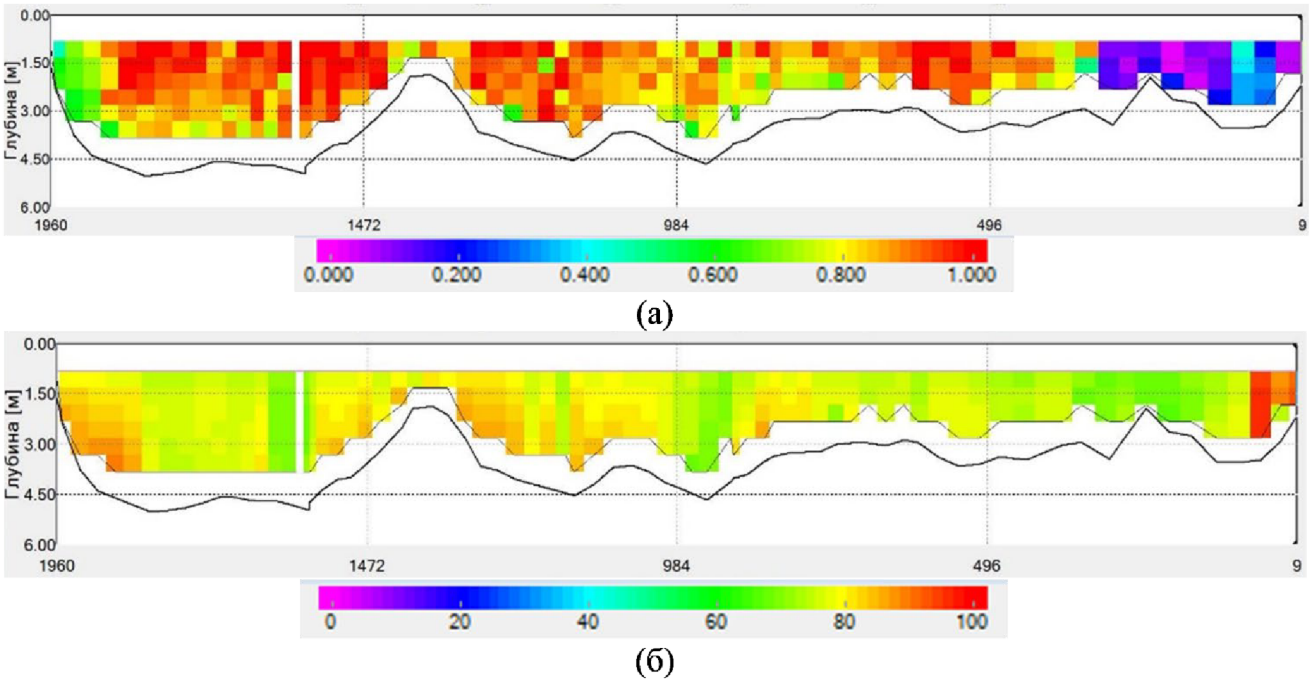



**Рисунок 6.** Совмещенные профили скорости течения, м/с (а) и обратного рассеяния, дБ (б) в русле реки Колыма в створе у едомы Дуванный Яр. По оси абсцисс – расстояние от правого берега, м.
**Figure 6.** Combined velocity (a) and backscatter (b) transects of the Kolyma River at the Duvanny Yar. On the x axis – the distance from the right bank.

***Распределение взвешенных наносов по поперечному профилю реки Колыма в районе едомы Дуванный Яр***

Измерения расхода воды реки Колыма с помощью АДПТ производились в створе едомы Дуванный Яр ниже небольшого осередка, сформированного, по-видимому, вынесенными с едомы отложениями (рисунок 5).

Небольшая протока между правым берегом и осередком шириной около 150–200 м на поперечном профиле русла, полученном при измерении с помощью АДПТ, является областью низких скоростей течения – от 0,05 до 0,40 м/с (рисунок 6а). При этом концентрация взвешенных наносов у правого берега – максимальная по всему руслу, что косвенно характеризуется величиной обратного рассеяния акустического сигнала АДПТ (рисунок 6б).

При этом в русле реки Колыма на профиле обнаруживаются дополнительные зоны, где величина обратного рассеяния повышена (рисунок 6б). Они приурочены преимущественно к грядовым образованиям в центральной части русла, которые находятся в области максимальных скоростей и, очевидно, активно размываются потоком. Однако таких величин, как у правого берега, где поступают наносы от таяния едомы Дуванный Яр, не наблюдается нигде в створе измерений.

## Выводы и обсуждение

Полученные в ходе нескольких экспедиций данные о концентрации наносов у едомы Дуванный Яр позволяют оценить ее как существенный источник твердого вещества и, связанного с ним, органического вещества в водах реки Колыма. Баланс наносов на участке позволяет говорить о 20%-ном повышении концентрации взвешенных наносов на участке реки Колыма на участке едомы Дуванный Яр. В жаркие летние дни со склона ледового комплекса формируется сеть мутьевых водотоков с суммарным дебитом более 10 л/с и расходом наносов более 5 кг/с.

Шлейф распространения взвеси от едомы Дуванный Яр простирается почти на 70 километров вниз по течению. Интенсивность поступления взвеси при этом зависит от температуры воздуха в летний период, которая в арктическом регионе проявляет тенденции к

существенному росту. Учитывая это, представляет интерес проведение оценок поступления наносов, а также связанного с ними органического вещества, от едомы Дуванный Яр в будущем. В перспективе следует организовать мониторинг объема вытаивающих пород путем высокоточного картографирования едомы фотограмметрическими методами.

## Благодарности

Теоретический обзор исследований внутриматериковых обнажений многолетнемерзлых пород выполнен при финансовой поддержке проекта РНФ 21-17-00181. Анализ дистанционных данных проводился в рамках программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды».

## Доступность данных

Все использованные данные доступны у авторов по запросу.

## Литература

*Баранова Ю.П., Бискэ С.Ф.* История развития рельефа Сибири и Дальнего Востока. Северо-Восток СССР. М.: Наука, 1964. 290 с.

*Васильчук Ю.К., Вайкмяэ Р.А., Пуннинг Я.М., Лейбман М.О.* Изотопия, палинология и гидрохимия повторно-жильных льдов органо–минерального комплекса Дуванный Яр // Доклады академи наук СССР. 1987. Т. 292. № 5. С. 1207–1211.

*Васильчук Ю.К., Буданцева Н.А., Бартова А.В., Зимов С.А.* Вариации стабильных изотопов кислорода в повторно-жильных льдах циклитной едомы Станчиковского Яра на реке Малый Анюй // Арктика и Антарктика. 2018. № 3. С. 37–56. DOI: 10.7256/2453-8922.2018.3.27121.

*Васьковский А.П.* Очерк стратиграфии антропогенных (четвертичных) отложений крайнего северо-востока Азии // Сб. статей «Геология Корякского нагорья» / Под ред. канд. геол.-минер. наук Б.Х. Егиазарова. М.: Госгортехиздат, 1963. С. 143–168.

*Губин С.В.* Палеопедологический анализ верхнеплейстоценовых (едомных) отложений обнажения Дуванный Яр // Бюллетень Комиссии по изучению четвертичного периода. №53. М.: Наука, 1984. С. 125–128.

*Каплина Т.Н., Гитерман Р.Е., Лахтина О.В.* Дуванный яр – опорный разрез позднеплейстоценовых отложений Колымской низменности // Бюллетень Комиссии по изучению четвертичного периода. №48. М.: Наука, 1978. С. 49–65.

## References

Agafonova S.A., Frolova N.A., Surkova G.V., Koltermann K.P. Modern characteristics of the ice regime of russian arctic rivers and their possible changes in the 21st centure. *Geography, environment, sustainability*, 2017, vol. 10, iss. 4, pp. 4–15. DOI: 10.24057/2071-9388-2017-10-4-4-15.

Are F.E. The Contribution of Shore Thermoabrasion To the Laptev Sea. *Permafrost: Proceedings of the Seventh International Conference (Yellowknife, NWT, Canada, June 23–27, 1998)*. Canada: Yellowknife, 1998. Collection Nordicana № 57, pp. 25–30.

Baranova Yu.P., Biske S.F. *Istoriya razvitiya rel'efa Sibiri i Dal'nego Vostoka. Severo-Vostok SSSR [History of the development of the relief of Siberia and the Far East. Northeast of the USSR]*. Moscow, Publ. Nauka, 1964. 290 p. (In Russian).

Chalov S.R., Bazilova V.O., Tarasov M.K. Suspended sediment balance in Selenga delta at the late XX–early XXI century: simulation by landsat satellite images. *Water Resources*, 2017, vol. 44, iss. 3, pp. 463–470. DOI: 10.1134/S0097807817030071. (Russ. ed.: Chalov S.R., Bazilova V.O., Tarasov M.K. Balans vzveshennykh nanosov v del'te Selengi v kontse XX-nachale XXI veka: modelirovanie po dannym snimkov Landsat. *Vodnye resursy*, 2017, vol. 44, iss. 3, pp. 332–339. DOI: 10.7868/S0321059617030075).

Chalov S.R., Liu S., Chalov R.S., Chalova E.R., Chernov A.V., Promakhova E.V., Berkovitch K.M., Chalova A.S., Zavadsky A.S., Mikhailova N. Environmental and human impacts

*Кравцова В.И., Инюшин А.Н.* Природное районирование дельты Лены для исследования динамики ее морского края // Материалы Международной конференции «ИнтерКарто. ИнтерГИС» (Мурманск (Россия), 30 января – 2 февраля, Токио (Япония), 20 июля 2019 г.). Москва: Издательство МГУ, 2019. С. 161–174. DOI: 10.35595/2414-9179-2019-2-25-161-174.

*Магрицкий Д.В., Фролова Н.Л., Агафонова С.А., Ефимов В.А., Василенко А.Н., Сазонов А.А., Ефимова Л.Е.* Гидрологические условия в устье реки Колымы летом 2019 года // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2022. № 1. С. 134–151.

*Морейдо В.М., Чалов С.Р., Иванов В.А., Крастынь Е.А.* Применение допплеровских измерителей течений для оценки стока наносов // Материалы конференции «Маккавеевские чтения» (online, 7 декабря 2020 года). М.: Издательство МГУ, 2020. С. 35–45.

*Русанов Б.С., Бороденкова З.Ф., Гончаров В.Ф.* Геоморфология Восточной Якутии. Якутск: Якуткнигоиздат, 1967. 376 с.

*Соловьев П.А.* Аласный рельеф Центральной Якутии и его происхождение // Сборник статей «Многолетнемерзлые породы и сопутствующие им явления на территория Якутской АССР» / Под ред. Граве Н.А. М.: Изд-во Акад. наук СССР, 1962. С. 38–53.

*Томирдиаро С.В.* Лессово-ледовая формация верхнеплейстоценовой гиперзоны в Северном полушарии // Труды Северо-Восточного комплексного института ДВНЦ АН СССР. Вып. 68. Магадан: Кн. изд-во, 1975. С. 170–197.

*Томирдиаро С.В.* Лессово-ледовая формация Восточной Сибири в позднем плейстоцене и голоцене. М.: Наука, 1980. 184 с.

*Томирдиаро С.В. Черненький Б.И.* Криогенно-эоловые отложения Восточной Арктики и Субарктики. М.: Наука, 1987. 196 с.

*Чалов С.Р., Базилова В.О., Тарасов М.К.* Баланс взвешенных наносов в дельте Селенги в конце XX-начале XXI века: моделирование по данным снимков Landsat // Водные ресурсы. 2017. Т. 44.

on sediment transport of the largest Asian rivers of Russia and China. *Environmental Earth Sciences*, 2018, vol. 77, iss. 7, 274. DOI: 10.1007/s12665-018-7448-9.

Chalov S.R., Pashkina M.P., Kasimov N.S., Potemkina T.G. Evolution of suspended sediment budget in the deltas of lake Baikal tributaries. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2019, vol. 44, iss. 10, pp. 667–673. DOI: 10.3103/S1068373919100042. (Russ. ed.: Chalov S.R., Potemkina T.G., Pashkina M.P., Kasimov N.S. Mnogoletnie izmeneniya balansa vzveshennykh nanosov v del'takh pritokov Baikala. *Meteorologiya i Gidrologiya*, 2019, vol. 10, pp. 50–59).

Chalov S., Prokopeva K., Habel M. North to south variations in the suspended sediment transport budget within large Siberian river deltas revealed by remote sensing data. *Remote Sensing*, 2021, vol. 13, iss. 22, 4549. DOI: 10.3390/rs13224549.

Chander G., Markham B.L., Helder D.L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, 2009, vol. 113, iss. 5, pp. 893–903. DOI: 10.1016/J.RSE.2009.01.007.

Chavez P.S.J. Image-based atmospheric corrections – revisited and improved. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 1996, vol. 62, iss. 9, pp. 1025–1036.

Dominguez Ruben L.G., Szupiany R.N., Latosinski F.G., López Weibel C., Wood M., Boldt J. Acoustic Sediment Estimation Toolbox (ASET): A software package for calibrating and processing TRDI ADCP data to compute suspended-sediment transport in sandy rivers. *Computers and geosciences*, 2020, vol. 140. DOI: 10.1016/j.cageo.2020.104499.

Griffin C.G., Frey K.E., Rogan J., Holmes R.M. Spatial and interannual variability of dissolved organic matter in the Kolyma River, East Siberia, observed using satellite imagery. *Journal of geophysical research: Biogeosciences*, 2011, vol. 116, iss. G3. G03018. DOI: 10.1029/2010JG001634.

Gubin S.V. Paleopedologicheskii analiz verkhnepleistotsenovykh (edomnykh) otlozhenii

№ 3. С. 332–339. DOI: 10.7868/S0321059617030075.

*Чалов С.Р., Потемкина Т.Г., Пашкина М.П., Касимов Н.С.* Многолетние изменения баланса взвешенных наносов в дельтах притоков Байкала // Метеорология и Гидрология. 2019. Т. 10. С. 50–59.

*Шило Н.А., Томирдиаро С.В.* Палеогеография и абсолютная геохронология позднего плейстоцена на северо-востоке Сибири // Мерзлотно-геологические процессы и палеогеография низменностей Северо-Востока Азии. Магадан, 1982. С. 9–22.

*Agafonova S.A., Frolova N.A., Surkova G.V., Koltermann K.P.* Modern characteristics of the ice regime of russian arctic rivers and their possible changes in the 21st centure // Geography, environment, sustainability. 2017. Т. 10. № 4. С. 4–15. DOI: 10.24057/2071-9388-2017-10-4-4-15.

*Are F.E.* The Contribution of Shore Thermoabrasion To the Laptev Sea // Permafrost: Proceedings of the Seventh International Conference (Yellowknife, NWT, Canada, June 23–27, 1998). Canada: Yellowknife, 1998. Collection Nordicana № 57. С. 25–30.

*Chalov S.R., Liu S., Chalov R.S., Chalova E.R., Chernov A.V., Promakhova E. V., Berkovitch K.M., Chalova A.S., Zavadsky A.S., Mikhailova N.* Environmental and human impacts on sediment transport of the largest Asian rivers of Russia and China // Environmental Earth Sciences. 2018. Т. 77. № 7. 274. DOI: 10.1007/s12665-018-7448-9.

*Chalov S., Prokopeva K., Habel M.* North to south variations in the suspended sediment transport budget within large Siberian river deltas revealed by remote sensing data // Remote Sensing. 2021. Vol. 13. № 22. 4549. DOI: 10.3390/rs13224549.

*Chavez P.S.J.* Image-based atmospheric corrections – revisited and improved // Photogrammetric engineering and remote sensing. 1996. Т. 62. № 9. С. 1025–1036.

*Dominguez Ruben L.G., Szupiany R.N., Latosinski F.G., López Weibel C., Wood M., Boldt J.* Acoustic Sediment Estimation Toolbox (ASET): A software package for calibrating and processing TRDI ADCP data to compute suspended-sediment transport in sandy rivers // Computers and

obnazheniya Duvannyi Yar [Paleopedological analysis of the Upper Pleistocene (yedoma) deposits of the Duvanny Yar outcrop]. *Byulleten' Komissii po izucheniyu chetvertichnogo perioda [Bulletin of the Commission for the Study of the Quaternary Period]*, iss. 53. Moscow, Publ. Nauka, 1984, pp. 125–128. (In Russian).

Hadjimitsis D.G., Clayton C.R.I., Hope V.S. An assessment of the effectiveness of atmospheric correction algorithms through the remote sensing of some reservoirs. *International journal of remote sensing*, 2004, vol. 25, iss. 18, pp. 3651–3674. DOI: 10.1080/01431160310001647993.

Kaplina T.N., Giterman R.E., Lakhtina O.V. Duvannyi yar – opornyi razrez pozdnepleistotsenovykh otlozhenii Kolymskoi nizmennosti [Duvanny Yar - a reference section of the Late Pleistocene deposits of the Kolyma Lowland]. *Byulleten' Komissii po izucheniyu chetvertichnogo perioda [Bulletin of the Commission for the Study of the Quaternary Period]*, iss. 48. Moscow, Publ. Nauka, 1978, pp. 49–65. (In Russian).

Kirk J.T.O. The upwelling light stream in natural waters. *Limnology and oceanography*, 1989, vol. 34, iss. 8, pp. 1410–1425. DOI: 10.4319/lo.1989.34.8.1410.

Kravtsova V.I., Inyushin A.N. Prirodnoe raionirovanie del'ty Leny dlya issledovaniya dinamiki ee morskogo kraya [Natural zoning of the Delta of Lena River for the research of the dynamics of its sea edge]. *Materialy Mezhdunarodnoi konferentsii «InterKarto. InterGIS. Geoinformatsionnoe obespechenie ustoichivogo razvitiya territorii» (Murmansk, Russia, 30 yanvarya – 2 fevralya 2019; Tokio, Yaponiya, 20 iyulya 2019) [Proceedings of the International conference «InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories» (Murmansk, Russia, 30 Yanuary – 2 February 2019; Tokio, Japan, 20 Yuly 2019)]*. Vol. 25. Part 2. Moscow, Publ. MSU, 2019, pp. 161–174. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.35595/2414-9179-2019-2-25-161-174.

Kulmala M., Lappalainen H., Petäjä T., Kerminen V.-M., Viisanen Y., Matvienko G., Melnikov V., Baklanov A., Bondur V., Kasimov N., Zilitinkevich S. Pan-Eurasian experiment (PEEX)

geosciences. 2020. T. 140. DOI: 10.1016/j.cageo.2020.104499.

*Chander G., Markham B.L., Helder D.L.* Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors // Remote Sensing of Environment. 2009. T. 113. № 5. C. 893–903. DOI: 10.1016/J.RSE.2009.01.007.

*Griffin C.G., Frey K.E., Rogan J., Holmes R.M.* Spatial and interannual variability of dissolved organic matter in the Kolyma River, East Siberia, observed using satellite imagery // Journal of geophysical research: Biogeosciences. 2011. T. 116. № G3. G03018. DOI: 10.1029/2010JG001634.

*Hadjimitsis D.G., Clayton C.R.I., Hope V.S.* An assessment of the effectiveness of atmospheric correction algorithms through the remote sensing of some reservoirs // International journal of remote sensing. 2004. T. 25. № 18. C. 3651–3674. DOI: 10.1080/01431160310001647993.

*Kirk J.T.O.* The upwelling light stream in natural waters // Limnology and oceanography. 1989. T. 34. № 8. C. 1410–1425. DOI: 10.4319/lo.1989.34.8.1410.

*Kulmala M., Lappalainen H., Petäjä T., Kerminen V.-M., Viisanen Y., Matvienko G., Melnikov V., Baklanov A., Bondur V., Kasimov N., Zilitinkevich S.* Pan-Eurasian experiment (PEEX) program: grand challenges in the arctic-boreal context // Geography, environment, sustainability. 2016. T. 9. № 2. C. 5–18. DOI: 10.15356/2071-9388_02v09_2016_01.

*Latosinski F.G., Szupiany R.N., García C.M., Guerrero M., Amsler M.L.* Estimation of concentration and load of suspended bed sediment in a large river by means of acoustic doppler technology // Journal of hydraulic engineering. 2014. T. 140. № 7. C. 04014023. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000859.

*McClelland J.W., Holmes R.M., Peterson B.J., Raymond P.A., Striegl R.G., Zhulidov A.V., Zimov S.A., Zimov N., Tank S.E., Spencer R.G.M., Staples R., Gurtovaya T.Y., Griffin C.G.* Particulate organic carbon and nitrogen export from major Arctic rivers // Global biogeochemical cycles. 2016.

program: grand challenges in the arctic-boreal context. *Geography, environment, sustainability*, 2016, vol. 9, iss. 2, pp. 5–18. DOI: 10.15356/2071-9388_02v09_2016_01.

Latosinski F.G., Szupiany R.N., García C.M., Guerrero M., Amsler M.L. Estimation of concentration and load of suspended bed sediment in a large river by means of acoustic doppler technology. *Journal of hydraulic engineering*, 2014, vol. 140, iss. 7, 04014023. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000859.

Magritsky D.V., Frolova N.L., Agafonova S.A., Efimov V.A., Vasilenko A.N., Sazonov A.A., Efimova L.E. Gidrologicheskie usloviya v ust'e reki Kolymy letom 2019 goda [Hydrological conditions at the mouth of the Kolyma River in summer 2019]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya [Moscow University Bulletin. Series 5. Geography]*, 2022, iss. 1, pp. 134–151. (In Russian; abstract in English).

McClelland J.W., Holmes R.M., Peterson B.J., Raymond P.A., Striegl R.G., Zhulidov A.V., Zimov S.A., Zimov N., Tank S.E., Spencer R.G.M., Staples R., Gurtovaya T.Y., Griffin C.G. Particulate organic carbon and nitrogen export from major Arctic rivers. *Global biogeochemical cycles*, 2016, vol. 30, iss. 5, pp. 629–643. DOI: 10.1002/2015GB005351.

Moreido V.M., Chalov S.R., Ivanov V.A., Krastyn' E.A. Primenenie dopplerovskikh izmeritelei techenii dlya otsenki stoka nanosov [Application of Doppler current meters to assess sediment runoff]. *Materialy konferentsii «Makkaveevskie chteniya» (online, 7 dekabrya 2020 goda) [Proceedings of the Makkaveev Readings conference (online, December 7, 2020)]*. Moscow, Publ. MSU, 2020, pp. 35–45. (In Russian).

Mueller D.S., Wagner C.R., Rehmel M.S., Oberg K.A, Rainville F. *Measuring discharge with acoustic Doppler current profilers from a moving boat (ver. 2.0, December 2013)*. U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 3, chap. A22, 2013. 95 p. DOI: 10.3133/tm3A22.

Murton J.B., Goslar T., Edwards M.E., Bateman M.D., Danilov P.P., Savvinov G.N., Gubin S.V., Ghaleb B., Haile J., Kanevskiy M.,

T. 30. № 5. C. 629–643. DOI: 10.1002/2015GB005351.

*Mueller D.S., Wagner C.R., Rehmel M.S., Oberg K.A, Rainville F.* Measuring discharge with acoustic Doppler current profilers from a moving boat (ver. 2.0, December 2013) // U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 3, chap. A22, 2013. 95 p. DOI: 10.3133/tm3A22.

*Murton J.B., Goslar T., Edwards M.E., Bateman M.D., Danilov P.P., Savvinov G.N., Gubin S.V., Ghaleb B., Haile J., Kanevskiy M., Lozhkin A. V., Lupachev A. V., Murton D.K., Shur Y., Tikhonov A., Vasil'chuk A.C., Vasil'chuk Y.K., Wolfe S.A.* Palaeoenvironmental interpretation of Yedoma Silt (ice complex) deposition as cold-climate loess, Duvanny Yar, Northeast Siberia // Permafrost and periglacial processes. 2015. T. 26. № 3. C. 208–288. DOI: 10.1002/PPP.1843.

*Pokrovsky O.S., Manasypov R.M., Loiko S., Shirokova L.S., Krickov I.A., Pokrovsky B.G., Kolesnichenko L.G., Kopysov S.G., Zemtzov V.A., Kulizhsky S.P., Vorobyev S.N., Kirpotin S.N.* Permafrost coverage, watershed area and season control of dissolved carbon and major elements in western Siberian rivers // Biogeosciences. 2015. T. 12. № 21. C. 6301–6320. DOI: 10.5194/bg-12-6301-2015.

*Sher A.* Yedoma as a store of paleoenvironmental records in Beringida // Beringia Paleoenvironmental Workshop / Под ред. Elias S., Brigham-Grette J. 1997. C. 92–94.

*Szupiany R.N., Weibel C.L., Guerrero M., Latosinski F., Wood M.S., Ruben L.G.D., Oberg K.* Estimating sand concentrations using ADCP-based acoustic inversion in a large fluvial system characterized by bi-modal suspended-sediment distributions // Earth Surface Processes and Landforms. 2019. T. 44. № 6. C. 1295–1308. DOI: 10.1002/esp.4572.

*Zanina O.G., Gubin S. V, Kuzmina S.A., Maximovich S. V, Lopatina D.A.* Late-Pleistocene (MIS 3-2) palaeoenvironments as recorded by sediments, palaeosols, and ground-squirrel nests at Duvanny Yar, Kolyma lowland, northeast Siberia // Quaternary science reviews. 2011. T. 30. №17–18. C. 2107–2123. DOI: 10.1016/j.quascirev.2011.01.021.

Lozhkin A. V., Lupachev A. V., Murton D.K., Shur Y., Tikhonov A., Vasil'chuk A.C., Vasil'chuk Y.K., Wolfe S.A. Palaeoenvironmental interpretation of Yedoma Silt (ice complex) deposition as cold-climate loess, Duvanny Yar, Northeast Siberia. *Permafrost and periglacial processes*, 2015, vol. 26, iss. 3, pp. 208–288. DOI: 10.1002/PPP.1843.

Pokrovsky O.S., Manasypov R.M., Loiko S., Shirokova L.S., Krickov I.A., Pokrovsky B.G., Kolesnichenko L.G., Kopysov S.G., Zemtzov V.A., Kulizhsky S.P., Vorobyev S.N., Kirpotin S.N. Permafrost coverage, watershed area and season control of dissolved carbon and major elements in western Siberian rivers. *Biogeosciences*, 2015, vol. 12, iss. 21, pp. 6301–6320. DOI: 10.5194/bg-12-6301-2015.

Rusanov B.S., Borodenkova Z.F., Goncharov V.F. *Geomorfologiya Vostochnoi Yakutii [Geomorphology of Eastern Yakutia]*. Yakutsk, Publ. Yakutknigoizdat, 1967. 376 p. (In Russian).

Sher A. Yedoma as a store of paleoenvironmental records in Beringida. In Elias S., Brigham-Grette J. (eds.) *Beringia Paleoenvironmental Workshop*. 1997, pp. 92–94.

Shilo N.A., Tomirdiaro S.V. Paleogeografiya i absolyutnaya geokhronologiya pozdnego pleistotsena na severo-vostoke Sibiri [Paleogeography and absolute geochronology of the late Pleistocene in the northeast of Siberia]. In Shumilov Yu.V. (ed.) *Merzlotno-geologicheskie protsessy i paleogeografiya nizmennostei Severo-Vostoka Azii [Permafrost-geological processes and paleogeography of the lowlands of Northeast Asia]*. Magadan, 1982, pp. 9–22. (In Russian).

Solov'ev P.A. Alasnyi rel'ef Tsentral'noi Yakutii i ego proiskhozhdenie [Alas relief of Central Yakutia and its origin]. In Grave N.A. (ed.) *Mnogoletnemerzlye porody i soputstvuyushchie im yavleniya na territoriya Yakutskoi ASSR [Permafrost rocks and accompanying phenomena on the territory of the Yakut ASSR]*. Moscow, Publ. of Academy of Science USSR, 1962, pp. 38–53. (In Russian).

Szupiany R.N., Weibel C.L., Guerrero M., Latosinski F., Wood M.S., Ruben L.G.D., Oberg K. Estimating sand concentrations using ADCP-based acoustic inversion in a large fluvial system

characterized by bi-modal suspended-sediment distributions. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2019, vol. 44, iss. 6, pp. 1295–1308. DOI: 10.1002/esp.4572.

Tomirdiaro S.V. Lessovo-ledovaya formatsiya verkhnepleistotsenovoi giperzony v Severnom polusharii [Loess-ice formation of the Upper Pleistocene hyperzone in the Northern Hemisphere]. *Trudy Severo-Vostochnogo kompleksnogo instituta DVNTs AN SSSR [Proceedings of the North-Eastern Complex Institute of the Far Eastern Scientific Center of the USSR Academy of Sciences]*. Iss. 68. Magadan, Book publishing house, 1975, pp. 170–197. (In Russian).

Tomirdiaro S.V. *Lessovo-ledovaya formatsiya Vostochnoi Sibiri v pozdnem pleistotsene i golotsene [Loess-ice formation of Eastern Siberia in the late Pleistocene and Holocene]*. Moscow, Publ. Nauka, 1980. 184 p. (In Russian).

Tomirdiaro S.V. Chernen'kii B.I. *Kriogenno-eolovye otlozheniya Vostochnoi Arktiki i Subarktiki [Cryogenic-eolian deposits of the Eastern Arctic and Subarctic]*. Moscow, Publ. Nauka, 1987. 196 p. (In Russian).

Vasil'chuk Yu.K., Vaykmyae R.A., Punning Ya.-M.K., Leybman M.O. Oxygen isotope distribution, palynology and hydrochemistry of wedge ice in the organomineral complex of Duvanny Yar type section. *Transactions (Doklady) of the USSR Academy of Sciences. Earth Science Sections. Geology,* 1987, vol 292, pp. 69–72 (Russ. ed.: Vasil'chuk Yu.K., Vaikmyae R.A., Punning Ya.M., Leibman M.O. Izotopiya, palinologiya i gidrokhimiya povtorno-zhil'nykh l'dov organo–mineral'nogo kompleksa Duvannyi Yar. *Doklady akademi nauk SSSR*, 1987, vol. 292, iss. 5, pp. 1207–1211).

Vasil'chuk Y.K., Budantseva N.A., Bartova A.V., Zimov S.A. Variatsii stabil'nykh izotopov kisloroda v povtorno-zhil'nykh l'dakh tsiklitnoi edomy Stanchikovskogo Yara na reke Malyi Anyui [Variations of the stable oxygen isotopes in massive ice wedges of cyclical Yedoma of Stanchikovsky Yar on the Maly Anyui River]. *Arktika i Antarktika [Arctic and Antarctica]*, 2018, no. 3, pp. 37–56.

(In Russian; abstract in English). DOI: 10.7256/2453-8922.2018.3.27121.

Vas'kovskii A.P. Ocherk stratigrafii antropogennykh (chetvertichnykh) otlozhenii krainego severo-vostoka Azii [Essay on the stratigraphy of anthropogenic (Quaternary) deposits of the extreme northeast of Asia]. In Egiazarov B.Kh. (ed.), *Geologiya Koryakskogo nagor'y [Geology of the Koryak Highlands]*. Moscow, Publ. Gosgortekhizdat, 1963, pp. 143–168. (In Russian).

Zanina O.G., Gubin S. V, Kuzmina S.A., Maximovich S. V, Lopatina D.A. Late-Pleistocene (MIS 3-2) palaeoenvironments as recorded by sediments, palaeosols, and ground-squirrel nests at Duvanny Yar, Kolyma lowland, northeast Siberia. *Quaternary science reviews*, 2011, vol. 30, iss. 17–18, pp. 2107–2123. DOI: 10.1016/j.quascirev.2011.01.021.

УДК 556.51.028
DOI: 10.34753/HS.2022.4.2.183

# ИДЕНТИФИКАЦИЯ И ОЦЕНКА ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ СТОКА ЗАБОЛОЧЕННОГО ВОДОСБОРА В БАССЕЙНЕ РЕКИ ЗАПАДНАЯ ДВИНА

Т.С. Губарева[1], Б.И. Гарцман[1], Л.Е. Ефимова[2], П.Н. Терский[2], П.А. Белякова[1], А.А. Казачук[2]
*[1]Институт водных проблем РАН, г. Москва, Россия; [2]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия*
tgubareva@bk.ru

**Аннотация.** Детальные исследования источников питания и механизмов формирования речного стока стали возможными в последние десятилетия благодаря развитию инструментария гидролого-гидрогеохимического анализа. С использованием трассерной модели смешения (EMMA) и данных гидролого-гидрохимических съемок уточнены источники питания реки Велеса в бассейне реки Западная Двина и выполнена их оценка. Источниками питания являются: воды валдайского надморенного водно- и озерно-ледникового водоносного горизонта, болотные воды, атмосферные воды. Продемонстрирован специфический характер их сезонной динамики в период с мая 2017 года по июнь 2018 года. Воды надморенного водно- и озерно-ледникового комплекса – значительная и постоянно действующая составляющая речного стока. Их доля в период весеннего половодья 2018 года составила – 21%, а в периоды, следующие за сходом половодья, их доля заметно выше: в 2017 году – 31%, в 2018 году – 38%. Значительная доля атмосферных вод отмечалась в зимний период 2017 года – до 30%, что обусловлено избыточной увлажненностью водосбора в результате выпадения аномальных

# IDENTIFICATION AND QUANTIFICATION OF GEOGRAPHICAL WATER SOURCES IN A SWAMP CATCHMENT IN THE ZAPADNAYA DVINA RIVER BASIN

Tatiana S. Gubareva[1], Boris I. Gartsman[1], Ludmila E. Efimova[2], Pavel N. Tersky[2], Pelagia A. Belyakova[1], Alena A. Kazachuk[2]
*[1]Water Problems Institute RAS, Moscow, Russia; [2]Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*
tgubareva@bk.ru

**Abstract.** Using the mixing model (EMMA) and hydrological and hydrochemical data, the geographical water sources for the Velesa river were identified and their quantitative assessment was made. They are: valdai super-moraine aquatic and lake-glacial aquifer water, swamp water, atmospheric precipitation water. EMMA-model results demonstrate the seasonal dynamics features of water sources in the period May 2017 – June 2018. Water of the super-moraine and lake-glacier aquifer are significant river runoff component constantly operating during year. Its proportion during the spring flood of 2018 is about 20%; its proportion in the periods following the spring flood is higher – in 2017 – 31%, in 2018 – 38%. Significant proportion of atmospheric precipitation waters is observed in the winter period of 2017 – up to 30%, it is due to excessive humidity of the catchment as a result of abnormal liquid precipitation and non-typical meteorological conditions in the first half winter period of 2017. The maximum proportion of atmospheric water (up to 60%) is occur during warm periods after a spring floods in 2017 and 2018. Antecedent watershed moistening and precipitation during the survey periods were the main reasons for the high proportion value. Atmospheric precipitation coming as a result of infiltration into the vadoze zone

*Губарева Т.С., Гарцман Б.И., Ефимова Л.Е., Терский П.Н., Белякова П.А., Казачук А.А.* Идентификация и оценка источников питания стока заболоченного водосбора в бассейне реки Западная Двина // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2022. Т. 4. Вып. 2. С. 183–201. DOI: 10.34753/HS.2022.4.2.183.

жидких осадков и нетипичной метеорологической обстановкой в первой половине зимнего периода 2017 года. Максимальные доли атмосферных вод (до 60%) отмечаются в теплые периоды, после схода весеннего половодья, 2017 и 2018 годах. Предшествующее увлажнение водосбора и осадки в периоды съемок были главными причинами высокой их доли. Атмосферные осадки, поступающие в результате инфильтрации в верхнюю зону аэрации практически без существенной трансформации их химического состава (верховодка), разгружаются в реку подповерхностным путем. Болотные воды преобладали в речных водах во время весеннего половодья – 46%, их доля высока и во время зимнего периода (до 35%), а в периоды начала лета – близки к нулю.

**Ключевые слова:** источники питания; EMMA-модель; метод главных компонент; химические трассеры; воды болотных отложений; водосбор; гидрохимические наблюдения.

without significant transformation of their chemical composition (temporary perched water) is discharged into the river by a subsurface flow path. Swamp water is prevailed in river water during the spring flood – 46%, its proportion is also high during the winter period – up to 35%, and in early summer periods – decline to zero.

**Keywords:** geographical water sources; EMMA-model; principal component analysis; chemical tracers; water of swamp deposits; catchment; hydrochemical observations.

## Введение

Детальные исследования источников питания и механизмов формирования речного стока стали возможными в последние десятилетия благодаря развитию инструментария гидролого-гидрогеохимического анализа. Многочисленные графические, численные (основанные на обработке гидрографа как сигнала) и концептуальные методы (основанные на представлении водосборов как емкостей и анализе кривых истощения) [Pelletier, Andréassian, 2020] расчленения гидрографа неоднократно подвергались критике [Klaus, McDonnell, 2013] и применимы в основном для инженерных расчетов и при массовой обработке рядов. В России основным способом количественной оценки составляющих речного стока является метод разделения гидрографа, предложенный Б.И. Куделиным [Попов, 1968]. Позднее для уточнения подземной составляющей руслового стока активно использовались гидрологический метод (по минимальным 30-дневным расходам зимней межени) и гидролого-гидрохимические методы [Воронков, 1970; Соколов, Саркисян, 1981; Яковлев, 2014]. Гидролого-гидрохимические методы позволяют снизить погрешности определения подземной составляющей стока в 2 раза, по оценке [Яковлев, 2014]. Существенный прогресс в идентификации и количественном оценивании составляющих стока связан с развитием методики трассерной модели смешения (end-members mixing analysis; далее – EMMA) [Cristophersen et al., 1990; Cristophersen, Hooper, 1992; Hooper, 2003; Hoeg, 2019]. Данный подход основан на предположении, что гидрохимический состав речной водной массы является результатом смешения отдельных источников или водных масс, циркулирующих в пределах водосбора и обладающих выраженной гидрохимической спецификой. Методика зарекомендовала себя эффективным инструментом не только при анализе и выявлении



Gubareva T.S., Gartsman B.I., Efimova L.E., Tersky P.N., Belyakova P.A., Kazachuk A.A. dentification and quantification of geographical water sources in A swamp catchment in the Zapadnaya Dvina river basin. *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2022, vol. 4, iss. 2, pp. 183–201 (In Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2022.4.2.183.

геохимической обстановки в бассейне [Bustillo et al., 2010], но и для установления конкретных типов источников питания и оценки их соотношения в речном стоке [Губарева и др., 2015; Rahman et al., 2015; Lv et al., 2018; Chen et al., 2019 и др.].

В общем виде выделяют следующие источники питания: снеговое, дождевое, подземные воды и ледниковое. Такое разделение неплохо подходит для общего представления характера водного режима, преимущественно средних и крупных рек. В пределах небольшого водосбора определяющую роль при формировании речной водной массы могут играть специфические источники питания, такие как почвенные воды, наледные, воды болотных массивов, при этом оценить их вклад и временную динамику прямыми измерениями практически невозможно.

В рамках данной статьи рассматривается применение гидролого-гидрохимического подхода, включающего адаптацию модели смешения методом EMMA, для выявления и количественного оценивания источников питания стока в пределах небольшого водосбора реки Велеса в бассейне реки Западная Двина. На исследуемом водосборе систематически выполнялись гидролого-гидрохимические съемки на протяжении 2017–2018 годов. Водосбор реки Велеса сильно заболочен и в ранее выполненных исследованиях «определить изменение доли участия болотных вод в речном стоке не представляется возможным» [Вомперский, Сирин, Глухов, 1988]. Возможность количественной оценки вклада болотной составляющей при отсутствии гидрометрических способов представляется перспективной для оценки роли болот в формировании стока рек и составляет новизну исследования.

## Характеристика водосбора, имеющиеся оценки источников питания

Река Велеса – левый приток реки Западная Двина, берет начало в юго-западной окраине Валдайской возвышенности (рисунок 1). Водосбор располагается в зоне смешанных лесов, климат умеренно-континентальный. Диапазон суммы годовых осадков – 550–750 мм. Площадь бассейна по устьевому створу составляет 1 420 км$^2$. Важной особенностью бассейна является наличие обширных лесомелиоративных систем, построенных в 1970-х годах [Вомперский, Сирин, Глухов, 1988] с целью экспериментального лесоосушения и изучения его последствий на водный режим и влияния болот на речной сток.

В пределах водосборной площади реки Велеса представлены все основные типы геологического строения подстилающей территории, характерные для российской части водосбора реки Западная Двина: отложения девонской и каменноугольной системы, а также четвертичные отложения, фрагментарно представленные отложениями осташковского оледенения[1].

Верхние горизонты коренных дочетвертичных пород залегают на глубине от 50 до 95 м. Породы представлены известняками, доломитами, мергелями и песчаниками с прослоями голубых и пестроцветных глин. Толща имеет общую мощность 8–100 м и относится к верхнефаменскому ярусу девонской системы. В верхней части бассейна девонское поле сменяется расчлененным уступом так называемого “карбонового плато”, где абсолютные отметки коренного ложа резко увеличиваются до 200–250 м, а мощность четвертичных отложений заметно снижается [Вомперский, Сирин, Глухов, 1988]. С увеличением эрозионного вреза регионального водотока, протекающего в южном направлении, одновременно возрастает мощность четвертичных отложений [Лебедева, 1972].

[1] Геологическая карта дочетвертичных отложений Тверской области. Масштаб 1:500 000. Под ред. Н.И. Сычкина, Е.А. Гаврюшовой, В.В. Дашевского. М.: МПР РФ Центральный региональный геологический центр, 1998.

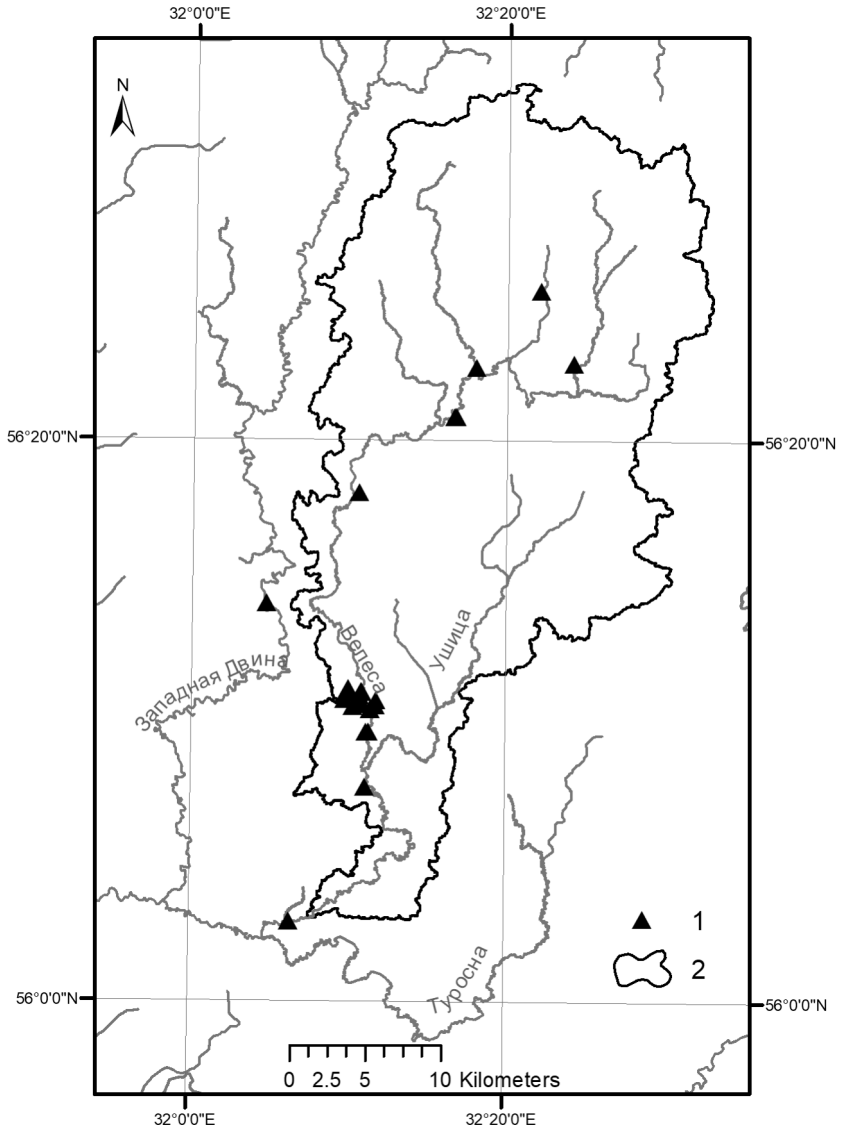



**Рисунок 1.** Водосбор река Велеса: 1 – точки отбора проб; 2 – границы водосбора.
**Figure 1.** The catchment area of the Velesa River: 1 – sampling points; 2 – catchment boundary.

Четвертичную толщу слагают в основном ледниковые образования, для которых характерно чередование моренных и межморенных толщ. Моренные толщи представлены валунными супесями, суглинками, песками. В наиболее полных разрезах насчитывается до трех – четырех моренных горизонтов. Они служат относительными водоупорами. Водовмещающие породы обычно межморенные, надморенные или подморенные флювиогляциальные или аллювиальные пески различной зернистости с большим или меньшим содержанием пылевато-глинистых примесей, гравийно-галечный материал с прослоями и линзами супесей, суглинков и глин. Они образуют гидравлически связанные между собой водоносные горизонты, составляющие единый комплекс мощностью от 5–15 до 80–100 м и более.

Особенность четвертичного покрова и рельефа, созданных в период наступания и деградации ледника, определили, наряду с климатическими предпосылками, возможности и характер начала болотообразовательных процессов, и, по сути, современное сочетание типов болотных ландшафтов.

Согласно оценкам [Лебедева, 1972], выполненным ранее по методу Б.И. Куделина, в формировании подземного питания рек данного района принимают участие водоносные комплексы четвертичных отложений,

представленные Валдайским надморенно водно- и озерно-ледниковым водоносным горизонтом (fgl, lgl $Q_{III}v$) – до 60%, в нижней и средней части бассейна преобладают верхнедевонские комплексы, представленные водами верхнефаменского (хованско-лебедянского) водоносного горизонта (D3fm2) – до 40%.

Водоносный горизонт fgl, lgl $Q_{III}v$ является первым от поверхности, за исключением участков, перекрытых торфяниками и аллювиальными отложениями. Преобладающая мощность водовмещающих отложений – 3–10 м, но иногда достигает 20 м и более. Водоупором служат московские и местами валдайские моренные отложения. Воды – безнапорные, гидрокарбонатные кальциевые, слабоминерализованные (0,1–0,7 г/л).

Воды горизонта D3fm2 содержатся в сильно выщелоченных трещиноватых и закарстованных доломитах, известняках и песчаниках, переслаивающихся с мергелями, глинами и алевролитами [Лебедева, 1972]. Воды горизонта пресные с минерализацией 0,3–0,6 г/л, преимущественно гидрокарбонатные магниево-кальциевые. Водоносный горизонт напорный.

Авторы работы [Вомперский, Сирин, Глухов, 1988] также отмечают, что воды горизонта fgl, lgl $Q_{III}v$ – преимущественный источник грунтового питания, и не исключают наличие в долине реки Велеса тесной гидродинамической связи артезианских вод с грунтовыми и поверхностными. При высокой заболоченности бассейна существенную роль в питании реки играют воды болотных массивов. Водовмещающими породами служат торфы различного состава, водно-физические свойства которых сильно различаются в плане и в разрезе.

## Описание полевых измерений

*Гидрохимическая съемка* бассейна (рисунок 1) выполнялась в различные фазы водного режима. Речные воды, воды родников, болотные воды, дождевые воды отбирались в полиэтиленовые бутылки. Пробы снега отбирались в полиэтиленовые пакеты объемом до 5 литров. Температура, pH, удельная электропроводность воды (далее – *SPC*) измерялись in situ с помощью мультипараметрического гидрохимического зонда YSI Professional Plus. Методом капиллярного электрофореза [2] определялись главные ионы: $HCO_3^-$, $SO_4^{2-}$, $Cl^-$, $Ca^{2+}$, $Mg^{2+}$, $Na^+$, $K^+$, определение концентрации *Si* производилось фотометрическим методом согласно [Аналитические…, 2017]. *ХПК* было определено титриметрически арбитражным методом бихроматного окисления в модификации А.П. Остапени [1965], *цветность* – фотометрическим методом.

Повторные съемки выполнялись на выбранных репрезентативных объектах. *Родник Лагерный* располагается на склоне моренного холма у деревни Мухино и дренирует подземные воды, формирующиеся в пределах валдайского надморенного водно- и озерно-ледникового водоносного горизонта. Мощность напорной камовой морены здесь достигает 40 м [Вомперский, Сирин, Глухов, 1988]. Пробы воды отбирались непосредственно из выхода нисходящего родника.

*Пробы склоновых вод*, выклинивающихся в пределах слабовыраженной ложбины при выраженном переувлажнении верхнего слоя почвы, представляют приповерхностные склоновые воды, формирующиеся в пределах камовой морены. Пробы воды отбирались непосредственно из почвенной прикопки в месте концентрации воды. Условно этот объект обозначен нами как *родник Смородиновый*.

*Болотные воды* отбирались из двух мелиоративных каналов осушительных систем, детальное описание и схема расположения, которых даны в [Вомперский, Сирин, Глухов, 1988]. Осушительная система В-5 собирает сток с искусственно созданного водосбора площадью 11 км$^2$, занята преимущественно лесными болотами и заболоченными лесами мезо-евтрофного ряда. Небольшая осушительная система В-1 дренирует часть небольшого верхового болотного массива

[2] Комарова Н.В., Каменцев Я.С. Практическое руководство по использованию систем капиллярного электрофореза «Капель». СПб.: Веда, 2006. 212 с.

центрально-олиготрофного типа, где произрастают основные типы верховых болотных сосняков. Дренируемая площадь системы В-1 составляет 0,39 км$^2$ и представлена сопряженным рядом микроландшафтов: центральная часть – пушицево-кустарничково-сфагновый, а краевая часть – сосняками кустарничково-сфагновыми [Вомперский, Сирин, Глухов, 1988].

Уровень воды реки Велеса измерялся автоматическим логгером Solinst, который был установлен у села Сосвятское в теплый период года (май – октябрь). Сведения о ходе температур воздуха и атмосферных осадков были получены из архива ВНИИГМИ-МЦД[3] по наблюдениям на ближайшей метеостанции в городе Торопец. Гидрологические данные об уровнях и расходах воды по гидрологическим постам были получены с сайта АИС ГМВО[4].

## Методика оценивания источников питания речного стока

Метод EMMA сочетает применение физической модели смешения источников, построенной на принципе сохранения баланса воды и растворенных веществ, и статистическую процедуру анализа – метод главных компонент (далее – МГК) [Christophersen et al., 1990; Christophersen, Hooper, 1992; Hooper, 2003]. Детальное описание модели и расчетные формулы приведены в работе [Губарева и др., 2015]. Адаптация модели выполняется путем построения и анализа диаграмм смешения. Если химический состав речных вод контролируется процессом смешения трех преобладающих источников, диаграмма смешения строится в двухмерном пространстве, где по осям отображаются концентрации двух трассеров. Три вершины, соответствующие концентрациям трассеров в источниках, ограничивают поле смешения треугольной формы, внутри которого заключены точки, соответствующие пробам речных вод. При консервативном смешивании, правильном отборе трассеров и адекватности выбора источников, пробы речных вод, как правило, оказываются внутри треугольника, образующего пространство смешения. Расчет пропорций водных масс выполняется путем обратного решения системы уравнений модели смешения.

Модель смешения трех источников предусматривает использование двух трассеров, а при гидрохимических съемках определяется большое число показателей (потенциальных трассеров) и заранее неизвестно, какие из них и в какой степени обладают свойствами трассеров. Для генерализации данных и конструирования так называемых «сложных» трассеров применяется МГК [Christophersen et al., 1992], который позволяет сделать это путем проецирования полного набора исходных гидрохимических индикаторов (>>2) в подпространство низкой размерности (*U*-пространство). В *U*-пространстве каждая главная компонента (далее – ГК$_i$) интерпретируется как сложный модельный трассер и представляет собой линейные комбинации всех исходных гидрохимических показателей. Диаграмма смешения в этом случае строится с использованием первых двух ГК, значения которых используются и при решении модели смешения трех источников.

Качество МГК-модели оценивают долей суммарной дисперсии данных $\lambda_2$, объясненной первыми двумя ГК, и анализом остатков, представляющих собой разницу между рассчитанными по МГК-модели и измеренными концентрациями трассеров. Величина $\lambda_2$, при корректно построенной МГК-модели, должна быть на уровне 90%.

Применение модели смешения предполагает соблюдение некоторых условий: консервативность трассеров; контрастность источников, выраженная в различии их химических характеристик; низкая пространственная вариабельность концентрации трассеров в источниках.

[3] Специализированные массивы для климатических исследований [Электронный ресурс]. URL: http://aisori-m.meteo.ru/waisori/.
[4] Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО). [Электронный ресурс]. URL: https://gmvo.skniivh.ru/.

Проверка гипотезы консервативности каждого потенциального трассера выполняется на основании анализа линейности связи между измеренными значениями химического показателя и остатков, рассчитанных по МГК-модели [Hooper, 2003]. Для принятия гипотезы консервативности распределение остатков должно представлять собой случайный нормально-распределенный «шум». Валидация модели смешения выполняется путем сопоставления расчетных концентраций трассеров каждой пробы по модели смешения и фактически измеренных концентраций. Тесная корреляция между ними указывает на адекватность и достаточную точность модели. Методика и примеры ее применения для горных залесенных водосборов детально изложены в работе [Губарева и др., 2016].

## Результаты и обсуждение

### *Характеристика гидрометеорологических условий*

Анализируемый период с мая 2017 года по июнь 2018 года в целом характеризуется повышенной увлажненностью. Годовая сумма атмосферных осадков в 2017 году составила 912 мм при среднегодовом их количестве 755 мм. Влажными и прохладными выдались конец весны и два первых летних месяца (температуры воздуха были ниже нормы на 2,2–2,5°С, а количество осадков превышало норму до 40%), а также октябрь. В результате на реке Велеса шли частые паводки, летняя межень почти отсутствовала. В период с декабря 2017 года по январь 2018 года наблюдались зимние паводки, вызванные частыми оттепелями и обильными осадками, в том числе в виде дождя. В этот период выпало 171 мм осадков, что в 1,5 раза выше среднемесячных сумм. Зимняя межень и устойчивый ледостав отмечались во второй половине февраля по конец марта 2018 года. Весеннее половодье 2018 года прошло в средние сроки с максимальными уровнями в середине апреля и было средним по водности.

### *Анализ гидрохимических данных*

Обобщенные результаты химического анализа по группам вод приведены в таблице 1, а основные различия в соотношении главных ионов в исследованных образцах генетических типах вод представлены на диаграмме Пайпера (рисунок 2). Речные воды, отобранные из русла реки Велеса выше деревни Рудня, относятся к гидрокарбонатному классу с минерализацией, изменяющейся в диапазоне от 80 до 252 мг/л. В верховьях реки отмечается снижение минерализации русловых вод до значений не ниже 180 мг/л. В анионном составе преобладает $HCO_3^-$ – 70–100%-экв, а в катионном – $Ca^{2+}$ (50–90%-экв) при малом содержании $SO_4^{2-}$ – 1–20%-экв и $Cl^-$ – 1–30%-экв (рисунок 2). В меженный период отмечается увеличение минерализации до 200 мг/л и выше. При адаптации модели смешения пробы воды, отобранные в различных точках по реке Велеса, объединены в одну выборку в виду незначительного изменения гидрохимического состава, обусловленного не сменой режима питания, а случайными факторами.

Пробы склоновых вод (родник Смородиновый) имеют невысокую минерализацию 34–67 мг/л. Преобладающим катионом является $Mg^{2+}$ – 40–60%-экв, а среди анионов отмечается тенденция повышения содержания $Cl^-$ – 20–40%-экв и понижения $HCO_3^-$ – 80–60%-экв. Низкая минерализация склоновых вод свидетельствует об их атмосферном генезисе и слабой степени химической денудации.

Безнапорные воды из родника Лагерный, формирующиеся в пределах моренного холма, преимущественно нейтральные, при сравнении с пробами других объектов имеют более высокие значения pH и минерализацию 400–600 мг/л, содержание $HCO_3^-$ составляет более 90%-экв (рисунок 2), при малом содержании $SO_4^{2-}$ – <5%-экв и $Cl^-$ – <5%-экв, а преобладающим катионом является $Ca^{2+}$ – 60–70%-экв.

**Таблица 1.** Химический состав природных вод в бассейне реки Велеса; n – число проб. В числителе указан диапазон измерений, в знаменателе – среднее арифметическое значение.

**Table 1.** The chemical composition of natural waters in the Velesa river watershed; n – number of samples. The numerator indicates the measurement range, and the denominator indicates the arithmetic mean.

| Место отбора проб | n | pH | SPC, мсм/см | Цветность, град. | $\sum_i$ | ХПК | Si | $HCO_3^-$ | $SO_4^{2-}$ | $Cl^-$ | $Ca^{2+}$ | $Mg^{2+}$ | $Na^+$ | $K^+$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | мг/л | | | | | | | | | |
| Водотоки | | | | | | | | | | | | | | |
| река Велеса (рабочий створ) | 21 | 6,30–8,26<br>7,36 | 62,8–280<br>206 | 30–265<br>110 | 86–224<br>169 | 13,7–60,8<br>33,2 | 0,6–5,5<br>2,9 | 30,3–155<br>114 | 2,1–7,8<br>5,1 | 1,3–8,3<br>3,3 | 7,8–46,1<br>33,2 | 1,5–9,5<br>6,1 | 0,5–4,5<br>2,0 | 0,1–4,5<br>1,1 |
| река Велеса (верхний участок) | 10 | 6,59–8,40<br>7,39 | 51,8–266<br>166 | 25–254<br>151 | 78,1–267<br>147 | 9,8–59,8<br>39,4 | 1,01–4,60<br>3,1 | 27,5–194<br>100 | 1,1–11,9<br>5,5 | 0,3–5,4<br>2,2 | 10–50,1<br>26,1 | 1,8–10,9<br>5,7 | 1,4–5,2<br>3,00 | 0,5–1,9<br>1,2 |
| ручей Дорожный | 15 | 7,00–8,10<br>7,78 | 230–402<br>323 | 25,0–150<br>49,1 | 155–318<br>271 | 7,1–59,8<br>21,2 | 0,9–5,45<br>3,68 | 136–224<br>192 | 3,6–21<br>11,2 | 1,1–4,2<br>2,8 | 37,3–62,1<br>50 | 8,4–24,1<br>13,1 | 0,1–7,0<br>3,8 | 0,3–3,0<br>1,5 |
| ручей Ветреничный | 4 | 7,45–8,18<br>7,75 | 228–401<br>321 | 17,3–62,1<br>32,6 | 267–318<br>297 | 7,3–18,6<br>10,7 | 3,2–4,1<br>3,6 | 190–231<br>208 | 3,4–21,9<br>12,2 | 1,0–5,3<br>3,8 | 46,7–65,1<br>54,7 | 10,7–18,6<br>14,0 | 1,4–3,2<br>2,2 | 0,6–1,6<br>1,1 |
| ручей Хвощовый | 3 | 7,30–8,01 | 192–260 | 45,8–50,9 | 211–235 | 45,8–50,9 | 2,77–3,57 | 135–164 | 10,7–18 | 1,7–2,3 | 42,1–48,1 | 7,9–9,8 | 0,8–1,9 | 0,4–0,9 |
| ручей Белейка | 6 | 6,48–7,62<br>7,30 | 224–376<br>328 | 149–251<br>191 | 206–308<br>271 | 33,6–82,9<br>53,3 | 3,4–5,7<br>4,5 | 143–215<br>187 | 3,4–12,4<br>8,6 | 1,8–8,0<br>5,4 | 37,1–66,1<br>56,1 | 7,8–12,4<br>9,6 | 0,5–7,2<br>3,3 | 0,1–3,3<br>1,2 |
| ручей б/н (Острожки) | 7 | 6,38–8,17<br>7,41 | 70–325<br>209 | 10–253<br>147 | 98,8–270<br>187 | 7,1–84,6<br>36,6 | 3,0–6,3<br>4,91 | 33,1–181<br>123 | 2,8–12,2<br>7,7 | 1,5–5,5<br>3,6 | 23,8–56,1<br>36,2 | 2,1–9,7<br>6,2 | 1,3–4,5<br>3,2 | 0,7–1,4<br>1,0 |
| ручей Болотный | 8 | 5,90–7,73<br>7,16 | 61–305<br>241 | 85,5–176<br>107 | 23,3–25,2<br>196 | 20,7–120<br>42,8 | 1,2–3,86<br>3,41 | 9,7–179,4<br>138 | 1,5–6,9<br>4,48 | 1,5–4,0<br>2,41 | 3,9–48,9<br>37,5 | 1,5–12,4<br>8,65 | 1,0–4,2<br>2,57 | 0,6–2,7<br>1,33 |
| Родники и склоновые воды | | | | | | | | | | | | | | |
| Лагерный | 6 | 7,18–7,77<br>7,59 | 498–703<br>625 | 11–29,5<br>2,4 | 397–606<br>532 | 3,7–22,1<br>10,2 | 4,8–6,6<br>6,1 | 295–497<br>398 | 1,9–19,4<br>11,1 | 0,9–4,8<br>3,6 | 65,1–108<br>93,6 | 14,8–34<br>20,8 | 1,4–15<br>7,1 | 0,7–5,3<br>2,7 |
| Смородиновый | 5 | 6,7–6,9<br>6,8 | 52,2–100<br>64,1 | 65–74,3<br>69,4 | 34,8–66,8<br>44,1 | 15,2–34,4<br>22,2 | 2,1–5,0<br>2,8 | 17,5–50<br>26,7 | 0,6–6,1<br>4,3 | 0,4–3,1<br>1,4 | 5,2–10,4<br>6,80 | 1,5–3,2<br>2,3 | 1,1–2,1<br>1,7 | 0,5–1,1<br>0,8 |
| Мелиоративные каналы (сток с болот) | | | | | | | | | | | | | | |
| В-1 | 4 | 3,77–3,92<br>3,82 | 7,52–16,5<br>12,0 | 598–630<br>612 | 2,1–9,0<br>4,4 | 160–196<br>177 | 1,1–1,8<br>1,6 | 0–1,2<br>0,3 | 0,5–1,5<br>1,0 | 0,5–2,0<br>1,0 | 0,3–2,8<br>1,0 | 0–0,1 | 0,2–0,8<br>0,4 | 0–1,5<br>0,6 |
| В-5 | 8 | 6,39–7,98<br>7,06 | 146–321<br>250 | 200–345<br>266 | 118–265<br>209 | 43,2–98,5<br>62,7 | 0,4–6,3<br>4,0 | 78,6–196<br>161 | 0,8–3,5<br>2,5 | 0,5–3,4<br>1,4 | 21,4–49,9<br>40,4 | 3,3–12,4<br>8,6 | 0,5–2,7<br>1,9 | 0,1–1,1<br>0,8 |
| Атмосферные осадки | | | | | | | | | | | | | | |
| снег | 2 | 5,30–5,72 | 7,2–9,6 | 3–5 | 3,7–4,1 | 5,32–11,4 | 0,37–0,42 | 1,5 | 0,5–0,9 | 0,5–0,5 | 0,2 | 0,1 | 0,2–0,6 | 0,2–0,4 |
| дождь | 2 | 5,89–5,98 | 28,1–31,9 | 5 | 9,5–17,9 | 1,28–16,4 | 0,1 | 2,89–5,40 | 1,4–4,2 | 0,1–2,3 | 0,68–1,85 | 0,3–0,9 | 0,7–2,1 | 0,3–1,1 |

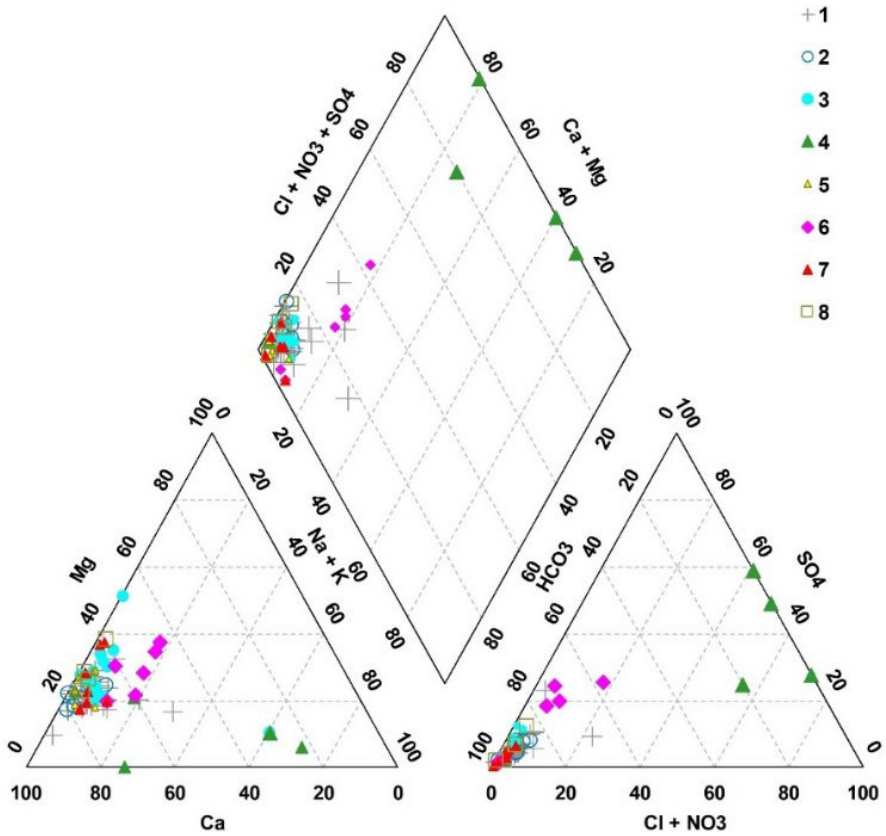



**Рисунок 2.** Диаграмма Пайпера, показывающая соотношения основных ионов, в %-экв:
1 – река Велеса; 2 – река Белейка; 3 – ручей Дорожный; 4 – канал В-1; 5 – канал В-5;
6 – родник Смородиновый; 7 – родник Лагерный; 8 – ручей Ветреничный.

**Figure 2.** Piper diagram showing ratios of major ions, in %-eq.
1 – Velesa river; 2 – Beleika river; 3 – Dorozhny stream; 4 – B-1 drain chanel; 5 – B-5 drain chanel;
6 – Smorodinovy spring; 7 – Lagerny spring; 8 – Vetrenchny stream.

Воды, отобранные из мелиоративной системы В-5, – пресные, имеют нейтральную реакцию. По содержанию главных ионов, кремния, минерализации эти воды подобны химическому составу естественных водотоков, а по показатели цветности и ХПК в них заметно выше. Эти признаки указывают, что в пределах этой мелиоративной системы питание водотока смешанное – присутствует “чистая” болотная составляющая, богатая органическими веществами, и грунтовая, обогащающая воду минеральными соединениями.

Болотные воды магистрального канала В-1 заметно отличаются по химическому составу от других поверхностных вод (таблица 1). Вода ультрапресная, кислая. Низкая минерализация свидетельствует об исключительном атмосферном генезисе этих вод. Другой отличительной их чертой является высокое содержание органических веществ. В пробах воды из канала В-1 величина ХПК в 3–16 раз превышает значения речных вод.

Между отдельными гидрохимическими показателями отмечаются статистически значимые связи (рисунок 3). Тесные линейные взаимозависимости ($R^2 \geq 0{,}7$) демонстрируют такие пары характеристик как SPS – $HCO_3^-$, SPS – $Ca^{2+}$, SPS – $Mg^{2+}$, $HCO_3^-$ – $Mg^{2+}$. Менее выражены зависимости для пар ХПК – $Mg^{2+}$ и ХПК – $HCO_3^-$ ($R^2$ составляет 0,5–0,6). Наиболее слабая связь отмечается для пары $SO_4^{2-}$ – ХПК. Детальный ее анализ показывает, что нарушение вызвано двумя экстремальными значениями концентрации сульфатов, зафиксированных в пробах воды из верхнего течения реки Велеса. Не исключено, что подобные «выбросы» являются либо ошибкой лабораторного анализа, либо ошибкой отбора проб. Удаление двух

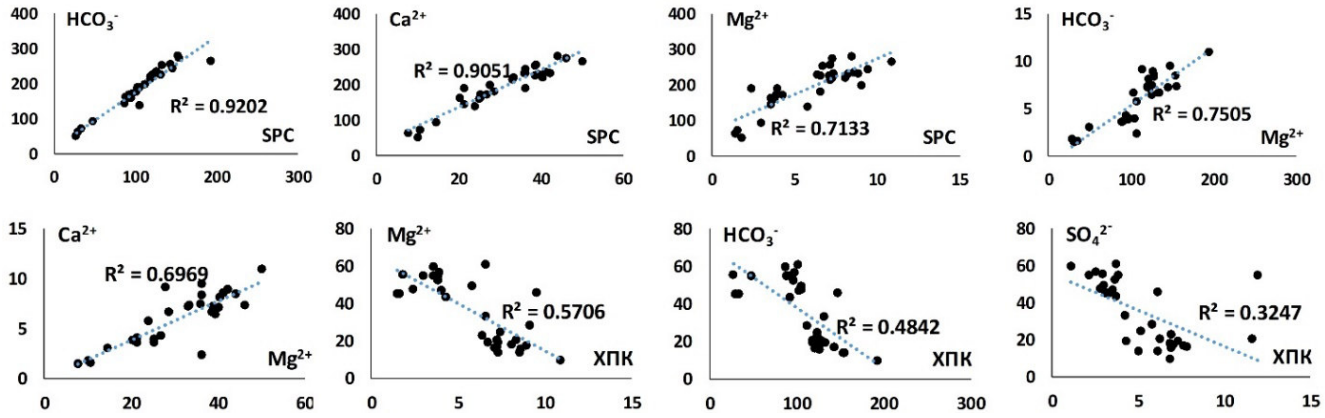



**Рисунок 3.** Парные зависимости между гидрохимическими показателями.
**Figure 3.** Relationships between pairs of hydrochemical indicators.

экстремальных значений из выборки приводит к повышению тесноты связи до 0,74. Ввиду ограниченности массива исходных данных было принято решение не исключать эти пробы из расчетов, а учитывать эти отклонения при анализе результатов.

На основе приведенного анализа показатели $HCO_3^-$, $Ca^{2+}$, $Mg^{2+}$, $SO_4^{2-}$, *ХПК*, *SPS* предварительно отобраны как потенциальные трассеры.

***Результаты моделирования***

Адаптация модели смешения была выполнена с использованием семи трассеров, гипотеза консервативности которых подтверждается случайным характером связи остатков (по МГК-модели) – с измеренными значениями (рисунок 4). Этот набор включает химические показатели, отобранные по тесноте и линейности взаимных связей (представлены в предыдущем разделе), и показатель Si, добавленный по опыту предыдущих исследований. Величина $\lambda_2$ для МГК-модели, построенной по матрице гидрохимических данных (31 проба речных вод), составляет 84%. Учитывая ограниченный объем и характер гидрохимических данных, величину объясненной дисперсии можно считать вполне приемлемой.

Диаграмма смешения была построена в пространстве главных компонент (*U*-пространстве), путем проецирования всех речных проб и проб предполагаемых источников (рисунок 5). Пробы источников и малых водотоков представлены в диаграмме средними значениями. На диаграмме смешения отчетливо заметны краевые источники (end-members), которые ограничивают поле речных проб: осредненная выборка проб родника Лагерный (пункт 7 легенды рисунка 5); выборка проб из канала В-1 (пункт 11); проба дождевых осадков (пункт 16). По расположению на диаграмме смешения источника родник Лагерный и его гидрохимическим характеристикам этот компонент речного стока можно интерпретировать как подземные воды надморенного водно- и озерно-ледникового водовмещающего горизонта. Его отличительные химические черты по [Лебедева, 1972] – повышенная минерализация до 700 мг/л, большее содержание ионов $HCO_3^-$, $Ca^{2+}$, $Mg^{2+}$ и невысокое содержание органических веществ (до 10 мг $O_2$/л по ХПК).

Химический состав источника, представленного пробами из канала В-1, имеет существенные отличия от других – высокую степень концентрации органических веществ (максимум ХПК достигает 196 мг $O_2$/л, цветность – 630 град.), низкую минерализацию вод (<10 мг/л). Место отбора проб, безусловно, указывает на генезис этой водной массы и интерпретируется как болотная составляющая речного стока.

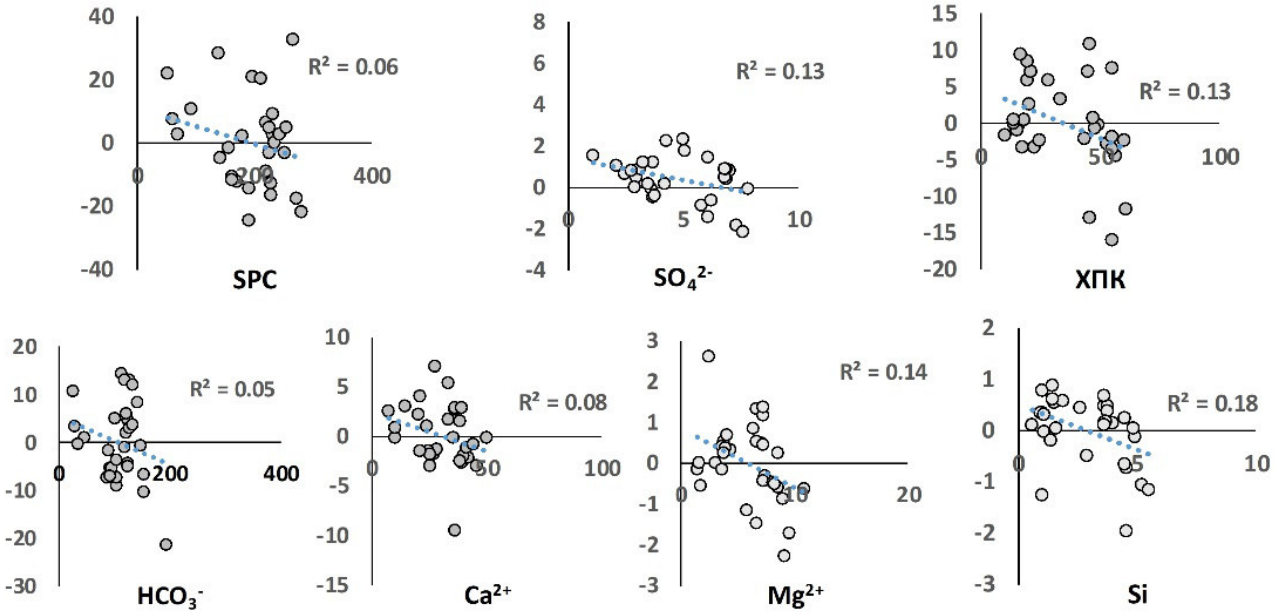



**Рисунок 4.** Зависимости «остатки – измеренные значения» по каждому трассеру.
**Figure 4.** «Residuals – measured values» dependencies for every tracer.

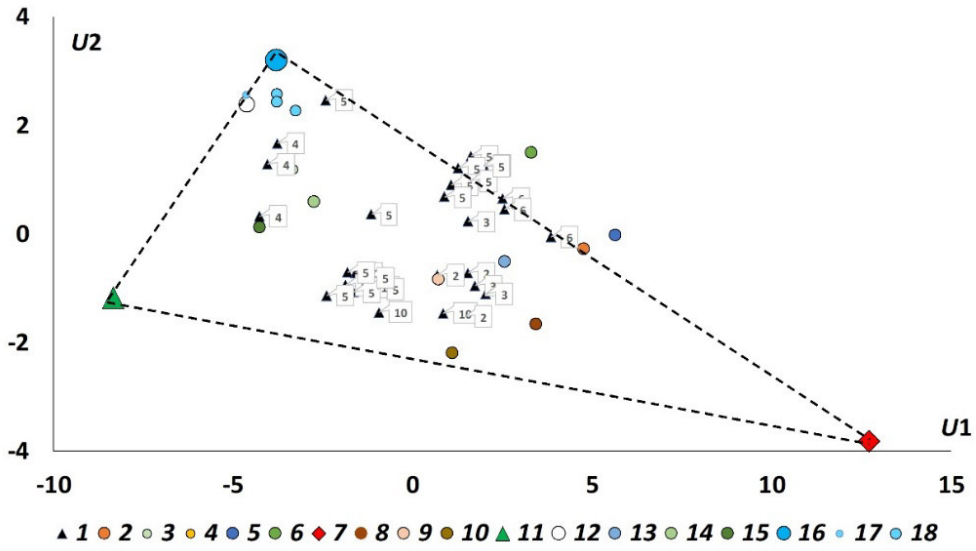



**Рисунок 5.** Диаграмма смешения вод р. Велеса в *U*-пространстве.
1 – речные пробы реки Велеса; пробы потенциальных источников: 2 – ручей Дорожный; 3 – родник Смородиновый; 4 – ручей Болотный; 5 – ручей Ветреничный; 6 – ручей Хвощовый; 7 – родник Лагерный; 8 – река Белейка; 9 – ручей у деревни Острожки; 10 – канал В-5; 11 – канал В-1; 12 – снег; 13 – родник Левый Борт; 14 – колодец (деревня Мухино); 15 – мочажина; 16 – 18 – осадки (Сосвятское, Красновидово, Истра). Номера в выносках – месяц отбора проб.
**Figure 5.** Water mixing diagram of the Velesa River in *U*-space.
1 – Velesa river samples; potential sources samples: 2 – Dorozhny stream; 3 – Smorodinovy spring; 4 – Bolotny stream; 5 – Vetrenichny stream; 6 – Khvoshchovy stream; 7 – Lagerny spring; 8 – Beleika river; 9 – stream near the Ostrozhki village; 10 – drain channel B–5; 11 – drain channel B–1; 12 – snow; 13 – Levyi Bort spring; 14 – well (Mukhino village); 15 – hollow; 16 – 18 – precipitation (Sosvyatskoe, Krasnovidovo, Istra). The numbers in the callouts are the month of sampling.

Третий источник представлен пробой атмосферных осадков, отобранной в бассейне реки Велеса (рисунок 5). К нему тяготеют и пробы снега (пункт 12 легенды). Химический состав этих проб сходен и имеет атмосферный генезис. Реакция атмосферных вод – нейтральная, им характерна низкая минерализация (около 10 мг/л) и низкая концентрация органических веществ (1–16 мг $O_2$/л по ХПК). Для подтверждения на диаграмму смешения спроецированы пробы атмосферных осадков, отобранных в пределах Истринской воднобалансовой станции. В *U*-пространстве они также располагаются в непосредственной близости к выбранной вершине.

На диаграмме смешения речные пробы образуют отдельные группировки и тяготеют к различным источникам. Эта закономерность обусловлена изменением химического состава речных вод, в том числе и вследствие изменения соотношения источников питания. Так, речные пробы, отобранные в апреле (на фазе половодья), тяготеют к стороне треугольника, соединяющего болотный и атмосферный источники (рисунок 5), и находятся в непосредственной близости к снеговой пробе. Группа проб, отобранных в холодный период года (октябрь – март), тяготеет к подземному источнику.

Вычисление долей источников в каждой пробе речного стока выполнено путем обратного решения модели смешения, что позволило схематично представить их динамику по датам измерений (рисунок 6) и охарактеризовать их сезонные изменения (таблица 2).

***Обсуждение результатов моделирования***

Стабильный подземный источник, интерпретируемый как валдайский надморенный водно- и озерно-ледниковый водоносный горизонт, обеспечивает питания речных вод реки Велеса на 20% – в половодье, до 38% – в периоды межени. Это согласуется с выводом о значительной доле этого водоносного горизонта в питании рек, полученным путем анализа гидрогеологического профиля района [Вомперский, Сирин, Глухов, 1988].

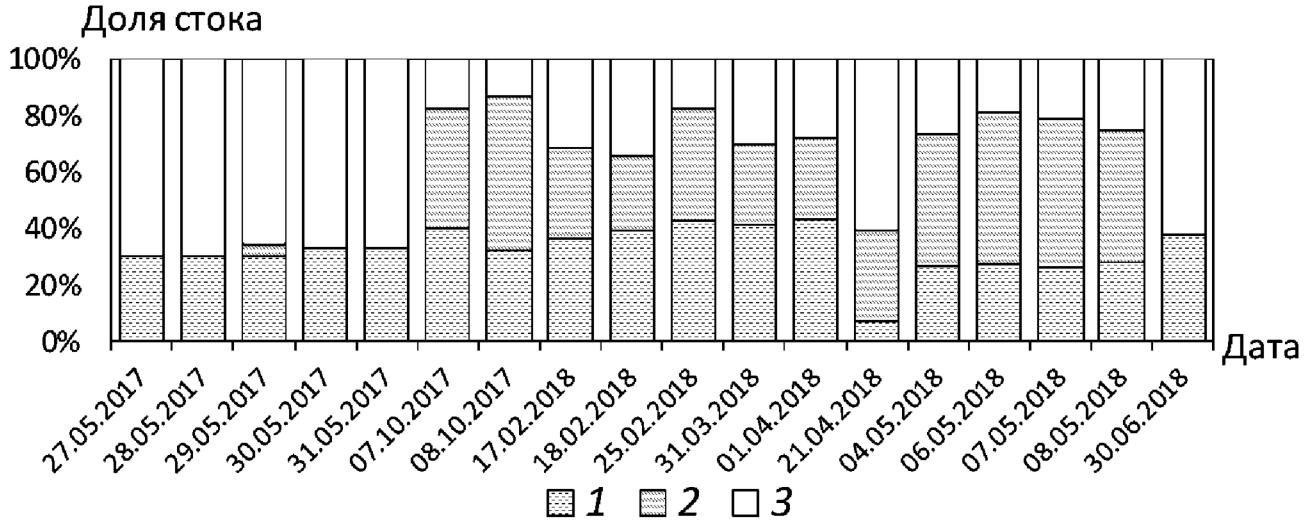



**Рисунок 6.** Динамика составляющих стока реки Велеса, рассчитанная по EMMA-модели на каждую дату отбора пробы: 1 – воды валдайского надморенного водно- и озерно-ледникового водоносного горизонта; 2 – воды болотных отложений; 3 – воды атмосферных осадков.

**Figure 6.** Runoff components dynamics of the Velesa River for each sampling date, calculated by the EMMA-model: 1 – waters of the Valdai supramoraine aquifer and lacustrine-glacial aquifer; 2 – waters of bog deposits; 3 – atmospheric precipitation water

**Таблица 2.** Доли (%) составляющих речного стока в характерные периоды года.
**Table 2.** Proportions (%) of river runoff components in distinctive year periods.

| **Составляющие речного стока** | **Весна 2017** | **Зимние паводки и межень 2017– 2018** | **Весеннее половодье 2018** | **Лето 2018** |
|---|---|---|---|---|
| | **3 декада мая** | **Сентябрь – март** | **Апрель – май** | **3 декада июня** |
| Воды валдайского надморенного водно- и озерно-ледникового водоносного горизонта | 31 | 38 | 21 | 38 |
| Воды болотных отложений | 2 | 35 | 46 | 0 |
| Воды атмосферных осадков | 67 | 28 | 33 | 62 |

В работе [Вомперский, Сирин, Глухов, 1988] также отмечается и существенная роль болотных вод в питании рек. Согласно модели смещения болотная составляющая речных вод оценивается в зимний период – 35%, а в половодный период 2018 года – 46%. В измеренный летний период (июнь) болотные воды не участвуют в формировании стока. На первый взгляд такие результаты кажутся преувеличенными. Однако ряд публикаций по анализу водного режима болот [Лавров, Калюжный, 2012; Калюжный, Лавров, Романюк, 2012; Харанжевская, Синюткина, 2017; Батуев, Калюжный, 2020] косвенно подтверждает диапазон оценок – в последние годы наблюдается увеличение зимнего речного стока, в том числе и из болотных массивов. К основным факторам, регулирующим соотношения зимнего и весеннего стока [Калюжный, Лавров, Романюк, 2012], относят: вследствие уменьшения глубины промерзания деятельного слоя, участие в стокоформировании части воды, ранее консервировавшейся в замерзшем слое; слои воды, образовавшиеся при фазовых переходах во время оттепелей; миграция влаги к фронту промерзания, которая происходит при понижении уровня грунтовых вод в холодный период года.

Нетипичная гидрометеорологическая ситуация в осеннее-зимний период на реке Велеса, сопровождающаяся обильными жидкими осадками и частыми оттепелями, очевидно, привела к избыточному наполнению болотного массива атмосферными водами и повышенному дренажу в речную систему.

Главной причиной уменьшения стока с верховых болотных массивов вплоть до полного его прекращения в меженные периоды теплого периода года является снижение уровня грунтовых вод до границы деятельного слоя и ниже [Павлова, Субоч, 1968]. Можно только предположить, что отсутствие болотной составляющей в стоке реки Велеса в мае 2017 года и в июне 2018 года (таблица 2) обусловлены аналогичной ситуацией. Очевидно, что усиление эвапотранспирации в период активной вегетации при снижении атмосферного питания в периоды, предшествующие датам расчета по модели, может приводит к удержанию воды, заключенной в болотном массиве. Полученный вывод о снижении болотной составляющей стока в период активной вегетации до нуля нуждается в дополнительной проверке, желательно с привлечением прямых детальных измерений элементов водного баланса.

Доля питания речных вод за счет атмосферных осадков – значительная и может составлять от 30 до 60% и более. Характерно, что в зимний период питание атмосферными водами не прекращалось и достаточно высоко (28%), что практически находится на уровне доли в весеннее половодье (33%). Это обусловлено, как изложено выше, специфической метеорологической ситуацией, сложившейся в бассейне в зимний период 2017/2018 года. Максимумы долей атмосферного питания отмечаются на даты съемки после схода весеннего половодья до наступления устойчивой летней межени и в 2017, и в 2018 годах. С учетом предшествующего увлажнения и регистрации осадков в эти

исследуемые периоды доля атмосферных вод представляется обоснованной. Однако во время съемок поверхностного склонового стекания не было отмечено. Очевидно, что в процессе инфильтрации талых снеговых и дождевых вод происходит их аккумуляция в первом от поверхности безнапорном водоносном горизонте – верховодке. По химическому свойству эта водная масса близка к составу атмосферных осадков. Подтверждением этому являются пробы, отобранные из колодца в деревне Мухино, которые по составу попадают в кластер речных проб, отобранных на половодье, и тяготеют к пробам атмосферных осадков.

Достоверность полученных оценок источников по модели смешения подтверждается результатами ее валидации, выполняемой путем сравнения выборок измеренных и модельных серий по коэффициенту корреляции (r). Наилучшая связь характерна для $HCO_3^-$ и *SPC* – r>0,91, для $Ca^{2+}$, $Mg^{2+}$, *Si* и *ХПК* – r>0,75. Более слабая связь проявляется для $SO_4^{2-}$ (r=0,62), но устранение из анализа двух выбросов (описанных выше) приводит к увеличению тесноты связи до r=0,85.

К недостатку применяемого подхода следует отнести экспертную интерпретацию источников питания. Применение изотопных трассеров воды в модели смешения и методов оценок времени контакта (mean resident time) воды на водосборе в перспективе могло бы разрешить эту проблему. Главной трудностью реализации такого подхода в России является необходимость организации специального высокочастотного мониторинга на водосборах и высоких затратах на лабораторные анализы.

## Выводы

Результаты выполненных гидролого-гидрохимических съемок в 2017 и 2018 годах в пределах водосбора реки Велеса бассейна реки Западная Двина позволили адаптировать модель смешения EMMA и сформулировать следующие выводы:

Уточнены виды источников питания характерных для водосбора реки Велеса. Ими являются: воды валдайского надморенного водного- и озерно-ледникового водоносного горизонта, болотные воды, воды атмосферных осадков.

Оценены доли источников питания и выявлен специфический характер их сезонной динамики в исследуемый период. Доля вод надморенного водного- и озерно-ледникового комплекса – довольно значительная, это постоянно действующая составляющая речного стока, ее величина в период половодья 2018 года составляет около 20%, а в периоды, следующие за сходом половодья, их доля возрастает и достигает – 31% и 38% в 2017 и 2018 годах соответственно.

Болотная составляющая речного стока также довольно значительна, но присутствует в определенные периоды водного цикла. В теплые периоды 2017 и 2018 годов, следующие за весенним половодьем, доля стока при активной вегетации и высоком испарении, согласно расчетам модели, падает до нуля. В половодный период болотная составляющая достигает максимума – 46%, в зимний она составляет около 35% от общего речного стока.

Специфическая гидрометеорологическая ситуация в 2017 году, отразившаяся в аномально высоких суммах осадков на 40–50% выше нормы, в том числе и в первую половину осенне-зимнего периода, а также в зимних оттепелях, определила высокую долю атмосферных вод (30%) в речных водах в зимний меженный период.

Доля атмосферных вод в теплый период года максимальна и достигает порядка 60%. Источник, представленный в модели как «атмосферные воды», поступает путем подповерхностного стекания из зоны аэрации – верховодки.

Существенной новизной работы можно считать появившуюся возможность оценки болотной составляющей стока на основе EMMA-модели, что демонстрирует перспективность этой методики для углубленного исследования закономерностей формирования водного режима заболоченных бассейнов рек и оценки динамики их компонент на климатические изменения.

**Благодарности**

Работа выполнена в рамках Государственного задания Института водных проблем Российской академии наук (тема №122041100222-7), а также при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект №17-77-30006_и).

**Литература**

*Аналитические*, кинетические и расчетные методы в гидрохимической практике / Под ред. П.А. Лозовика, Н.А. Ефременко. СПб.: Нестор-История, 2017. 272 с.

*Батуев В.И., Калюжный И.Л.* Анализ факторов, определяющих многолетнее изменение стока с олиготрофных болот // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2020. № 6. С. 28–46. DOI: 10.35567/1999-4508-2020-6-2.

*Вомперский С.Э., Сирин А.А., Глухов А.И.* Формирование и режим стока при гидромелиорации. М.: Наука, 1988. 168 с.

*Воронков П.П.* Гидрохимия местного стока европейской территории СССР (Основы гидрохимического принципа картирования). Л.: Гидрометиздат, 1970. 188 с.

*Губарева Т.С., Болдескул А.Г., Гарцман Б.И., Шамов В.В.* Анализ природных трассеров и генетических составляющих стока в моделях смешения (на примере малых бассейнов в Приморье) // Водные ресурсы. 2016. Т. 43. № 4. С. 387–399. DOI: 10.7868/S0321059616040064.

*Губарева Т.С., Гарцман Б.И., Шамов В.В., Болдескул А.Г., Кожевникова Н.К.* Разделение гидрографа стока на генетические составляющие // Метеорология и гидрология. 2015. № 3. С. 97–108.

*Калюжный И.Л., Лавров С.А., Романюк К.Д.* Изменения водного режима болот севера и северо-запада России под влиянием климатических факторов // Водные ресурсы. 2012. Т. 39. № 1. С. 13–25.

*Лавров С.А., Калюжный И.Л.* Физические процессы и закономерности формирования зимнего и весеннего стока рек бассейна Волги в

**Acknowledgments**

This study was carried out within the framework of the State Assignment of the Water Problems Institute Russian Academy of Sciences (subject no. 122041100222-7) and with the financial support of the Russian Science Foundation grant (project no. 17-77-30006_i).

**References**

*Analiticheskie, kineticheskie i raschetnye metody v gidrokhimicheskoi praktike [Analytical, kinetic and computational methods in hydrochemical practice]*. P.A. Lozovik, N.A. Efremenko (eds.). St. Petersburg: Publ. Nestor-Istoriya, 2017. 272 p. (In Russian).

Batuyev V.I., Kalyuzhniy I.L. Analiz faktorov, opredelyayushchikh mnogoletnee izmenenie stoka s oligotrofnykh bolot [Analysis of the factors determining many-year changes of runoff from oligotrophic bogs]. *Vodnoe khozyaistvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie [Water sector of Russia: problems, technologies, management]*, 2020, no. 6, pp. 28–46. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.35567/1999-4508-2020-6-2.

Bustillo V., Victoria R.L., Moura J.M.S., Victoria D.C., Toledo A.M.A., Collicchio E. Biogeochemistry of the Amazonian Floodplains: Insights from Six End-Member Mixing Models. *Earth interaction*, 2010, vol. 14, iss. 9, pp. 1–83. DOI: 10.1175/2010EI326.1.

Chen H., Chen Y., Li W., Li Zh. Quantifying the contributions of snow/glacier meltwater to river runoff in the Tianshan Mountains, Central Asia. *Global and Planetary Change*, 2019, vol. 174, pp. 47–57. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2019.01.002.

Christophersen N., Hopper R.P. Multivariate analysis of stream water chemical data: the use of principal component analysis for the end-member mixing problem. *Water Resources Research*, 1992, vol. 28, iss. 1, pp. 99–107. DOI: 10.1029/91WR02518.

Christophersen N., Neal C., Hooper R.P., Voght R.D., Andersen S. Modelling stream water chemistry of soilwater endmembers – a step towards second-generation acidification models. *Journal of*

условиях изменения климата // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2012. № 4. С. 74–84.

*Лебедева Н.А.* Естественные ресурсы подземных вод Московского артезианского бассейна. М.: Наука, 1972. 148 с.

*Остапеня А.П.* Полнота окисления органического вещества водных беспозвоночных методом бихроматного окисления // Доклады АН БССР. 1965. Т. 9. № 4. С. 273–276.

*Павлова К.К., Субоч В.В.* Оценка подземного стока в реки на заболоченных территориях // Труды ГГИ. Исследование подземного стока в реки. 1968. Вып. 122. С. 120–130.

*Попов О.В.* Подземное питание рек. Л.: Гидрометеоиздат, 1968. 291 с.

*Соколов Б.Л., Саркисян В.О.* Подземное питание горных рек (Методы количественной оценки). Л.: Гидрометеоиздат, 1981. 240 с.

*Харанжевская Ю.*А., *Синюткина А.А.* Исследование роли болот в формировании стока рек бассейна Средней Оби // География и природные ресурсы. 2017. № 3. С. 97–109. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2017-3(97-109).

*Яковлев П.И.* Определение подземной составляющей речного стока по гидрохимическим данным на примере Верхней Волги на участке от истока до г. Старицы // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Естественные науки. 2014. Т. 5. № 1. С. 92–109.

*Bustillo V., Victoria R.L., Moura J.M.S., Victoria D.C., Toledo A.M.A., Collicchio E.* Biogeochemistry of the Amazonian Floodplains: Insights from Six End-Member Mixing Models // Earth interaction. 2010. Т. 14. № 9. С. 1–83. DOI: 10.1175/2010EI326.1.

*Chen H., Chen Y., Li W., Li Zh.* Quantifying the contributions of snow/glacier meltwater to river runoff in the Tianshan Mountains, Central Asia // Global and Planetary Change. 2019. Т. 174. С. 47–57. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2019.01.002.

*Christophersen N., Hopper R.P.* Multivariate analysis of stream water chemical data: the use of *Hydrology*, 1990, vol. 116, iss. 1, pp. 307–320. DOI: 10.1016/0022-1694(90)90130-P.

Gubareva T.S., Boldeskul A.G., Gartsman B.I., Shamov V.V. Analysis of natural tracers and genetic runoff components in mixing models: case study of small basins in Primor'e. *Water Resources*, 2016, vol. 43, iss. 4, pp. 629–639. DOI: 10.1134/S0097807816040060. (Russ. ed.: Gubareva T.S., Boldeskul A.G., Gartsman B.I., Shamov V.V. Analiz prirodnykh trasserov i geneticheskikh sostavlyayushchikh stoka v modelyakh smesheniya (na primere malykh basseinov v Primor'e). *Vodnye resursy,* 2016, vol. 43, iss. 4, pp. 387–399. DOI: 10.7868/S0321059616040064).

Gubareva T.S., Gartsman B.I., Shamov V.V., Boldeskul A.G., Kozhevnikova N.K. Genetic disintegration of the runoff hydrograph. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2015, vol. 40, iss. 3, pp. 215–222. DOI: 10.3103/S1068373915030097. (Russ. ed.: Gubareva T.S., Gartsman B.I., Shamov V.V., Boldeskul A.G., Kozhevnikova N.K. Razdelenie gidrografa stoka na geneticheskie sostavlyayushchie. *Meteorologiya i gidrologiya*, 2015, no. 3, pp. 97–108).

Hoeg S. On the Balance Equations and Error Estimators for Separating n Time Components of Runoff with One Stable Isotope Tracer. *Water Resources Research*, 2019, vol. 55, iss. 10, pp. 8252–8269. DOI: 10.1029/2019WR025555.

Hooper R.P. Diagnostic tools for mixing models of stream water chemistry. *Water Resources Research*, 2003, vol. 39, iss. 3, pp. 2-1–2-13. DOI: 10.1029/2002WR001528.

Kalyuzhnyi I.L., Lavrov S.A., Romanyuk K.D. Variations in water regime of bogs in northern and northwestern russia under the effect of climatic factors. *Water Resources*, 2012, vol. 39, iss. 1, pp. 44–55. DOI: 10.1134/S0097807812010046. (Russ. ed.: Kalyuzhnyi I.L., Lavrov S.A., Romanyuk K.D. Izmeneniya vodnogo rezhima bolot severa i severo-zapada Rossii pod vliyaniem klimaticheskikh faktorov. *Vodnye resursy*, 2012, vol. 39, iss. 1, pp. 13–25).

Kharanzhevskaya Y.A., Sinyutkina A.A. Investigating the role of bogs in the streamflow

principal component analysis for the end-member mixing problem // Water Resources Research. 1992. Т. 28. № 1. С. 99–107. DOI: 10.1029/91WR02518.

*Christophersen N., Neal C., Hooper R.P., Voght R.D., Andersen S.* Modelling stream water chemistry of soilwater endmembers – a step towards second-generation acidification models // Journal of Hydrology. 1990. Т. 116. № 1. С. 307–320. DOI: 10.1016/0022-1694(90)90130-P.

*Hoeg S.* On the Balance Equations and Error Estimators for Separating *n* Time Components of Runoff with One Stable Isotope Tracer // Water Resources Research. 2019. Т. 55. № 10. С. 8252–8269. DOI: 10.1029/2019WR025555.

*Hooper R.P.* Diagnostic tools for mixing models of stream water chemistry // Water Resources Research. 2003. Т. 39. № 3. С. 2-1–2-13. DOI: 10.1029/2002WR001528.

*Klaus J., McDonnell J.J.* Hydrograph separation using stable isotopes: Review and evaluation // Journal of Hydrology. 2013. Т. 505. С. 47–64. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.09.006.

*Lv Y., Gao L., Geris J., Verrot L., Peng X.* Assessment of water sources and their contributions to streamflow by endmember mixing analysis in a subtropical mixed agricultural catchment // Agricultural Water Management. 2018. Т. 203. С. 411–422. DOI: 10.1016/j.agwat.2018.03.013.

*Pelletier A., Andréassian V.* Hydrograph separation: an impartial parametrisation for an imperfect method // Hydrology and Earth System Sciences. 2020. Т. 24. № 3. С. 1171–1187. DOI: 10.5194/hess-24-1171-2020.

*Rahman K., Besacier-Monbertrand A.-L., Castella E., Lods-Crozet B., Ilg Ch., Beguin O.* Quantification of the daily dynamics of streamflow components in a small alpine watershed in Switzerland using end member mixing analysis // Environmental Earth Sciences. 2015. Т. 74. № 6. С. 4927–4937. DOI: 10.1007/s12665-015-4505-5.

formation within the middle Ob basin. *Geography and Natural Resources*, 2017, vol. 38, iss. 3, pp. 256–266. DOI: 10.1134/S1875372817030064. (Russ. ed.: Kharanzhevskaya Yu.A., Sinyutkina A.A. Issledovanie roli bolot v formirovanii stoka rek basseina Srednei Obi. *Geografiya i prirodnye resursy*, 2017, no. 3, pp. 97–109. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2017-3(97-109)).

Klaus J., McDonnell J.J. Hydrograph separation using stable isotopes: Review and evaluation. *Journal of Hydrology*, 2013, vol. 505, pp. 47–64. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.09.006.

Lavrov S.A., Kalyuzhniy I.L. Fizicheskie protsessy i zakonomernosti formirovaniya zimnego i vesennego stoka rek basseina Volgi v usloviyakh izmeneniya klimata [Physical processes and regularities concerning the Volga river basin rivers winter and spring runoff formation in the conditions of climate change]. *Vodnoe khozyaistvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie* [*Water sector of Russia: problems, technologies, management],* 2012, no. 4, pp. 74–84. (In Russian; abstract in English).

Lebedeva N.A. Estestvennye resursy podzemnykh vod Moskovskogo artezianskogo basseina [Natural groundwater resources of the Moscow artesian basin]. Moscow, Publ. Nauka, 1972. 148 p. (In Russian).

Lv Y., Gao L., Geris J., Verrot L., Peng X. Assessment of water sources and their contributions to streamflow by endmember mixing analysis in a subtropical mixed agricultural catchment. *Agricultural Water Management,* 2018, vol. 203, pp. 411–422. DOI: 10.1016/j.agwat.2018.03.013.

Ostapenya A.P. Polnota okisleniya organicheskogo veshchestva vodnykh bespozvonochnykh metodom bikhromatnogo okisleniya [Completeness of oxidation of organic matter of aquatic invertebrates by the method of bichromate oxidation]. *Doklady AN BSSR [Reports of the Academy of Sciences of the BSSR]*, 1965, vol. 9, iss. 4, pp. 273–276. (In Russian).

Pavlova K.K., Suboch V.V. Otsenka podzemnogo stoka v reki na zabolochennykh territoriyakh [Assessment of underground runoff into rivers in wetlands]. *Trudy GGI. Issledovanie podzemnogo*

*stoka v reki [Proceedings of the GGI. Investigation of underground runoff into rivers]*, 1968, iss. 122, pp. 120–130. (In Russian).

Pelletier A., Andréassian V. Hydrograph separation: an impartial parametrisation for an imperfect method. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2020, vol. 24, iss. 3, pp. 1171–1187. DOI: 10.5194/hess-24-1171-2020.

Popov O.V. *Podzemnoe pitanie rek [Underground feeding of rivers]*. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1968. 291 p. (In Russian).

Rahman K., Besacier-Monbertrand A.-L., Castella E., Lods-Crozet B., Ilg Ch., Beguin O. Quantification of the daily dynamics of streamflow components in a small alpine watershed in Switzerland using end member mixing analysis. *Environmental Earth Sciences,* 2015, vol. 74, iss. 6, pp. 4927–4937. DOI: 10.1007/s12665-015-4505-5.

Sokolov B.L., Sarkisyan V.O. *Podzemnoe pitanie gornykh rek (Metody kolichestvennoi otsenki) [Underground feeding of mountain rivers (Methods of quantitative assessment)]*. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1981. 240 p. (In Russian).

Yakovlev P.I. Opredelenie podzemnoi sostavlyayushchei rechnogo stoka po gidrokhimicheskim dannym na primere Verkhnei Volgi na uchastke ot istoka do g. Staritsy [Determination of underground constituent of river runoff according to hydrochemical data by the example of upper Volga river in the zone from the source to Staritsy town]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Povolzhskii region. Estestvennye nauki [University proceedings. Volga region. Natural sciences]*, 2014, vol. 5, iss. 1, pp. 92–109. (In Russian; abstract in English).

Vomperskii S.E., Sirin A.A., Glukhov A.I. *Formirovanie i rezhim stoka pri gidromelioratsii [Formation and regime of runoff during hydromelioration]*. Moscow, Publ. Nauka, 1988. 168 p. (In Russian).

Voronkov P.P. *Gidrokhimiya mestnogo stoka evropeiskoi territorii SSSR (Osnovy gidrokhimicheskogo printsipa kartirovaniya) [Hydrochemistry of the local flow of the European territory of the USSR (Fundamentals of the*

*hydrochemical principle of mapping)]*. Leningrad, Publ. Gidrometizdat, 1970. 188 p. (In Russian).

УДК 550.42 (571.6)
DOI: 10.34753/HS.2022.4.2.202

# ДИНАМИКА ИЗОТОПНОГО СОСТАВА ($^2$H, $^{18}$O) ВОД МАЛЫХ РЕЧНЫХ БАССЕЙНОВ ЮЖНОГО СИХОТЭ-АЛИНЯ В ЛЕТНЕ-ОСЕННИЙ ПЕРИОД

В.В. Шамов[1], И.В. Токарев[2], Т.А. Михайлик[3], А.В. Козачек[4]

*[1]Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, г. Владивосток, Россия; [2]Ресурсный центр «Рентгено-дифракционные методы исследования», Научный парк СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия; [3]Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН, г. Владивосток, Россия; [4]Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург, Россия*

vlshamov@yandex.ru

**Аннотация.** Изотопный состав природной воды отражает ее приуроченность к различным звеньям гидрологического цикла, изменяясь в процессе фазовых переходов (испарения, транспирации, конденсации, замерзания, оттаивания), а также при взаимодействии воды с водовмещающими средами (горными породами, почвами, воздушными массами, биотой). В статье впервые на основе детальных натурных исследований, выполненных в период с 2013 по 2016 год в экспериментальных малых горных речных бассейнах, анализируется внутригодовая и межгодовая динамика содержания изотопов $^2$H и $^{18}$O в основных географических типах вод, циркулирующих в летне-осенний период в типичных речных бассейнах горной страны Сихотэ-Алинь (Приморский край Российской Федерации). Показано, что для малых речных бассейнов вблизи морского побережья характерен более тяжелый изотопный состав дождевых, речных и почвенных вод. Обосновывается предварительный вывод о том, что в относительно влажные годы воды континентальных горных районов Приморья по изотопному составу в среднем легче в сравнении

# SUMMER-AUTUMN VARIABILITY OF ISOTOPES ($^2$H AND $^{18}$O) IN WATER AT SMALL MOUNTAIN CATCHMENTS IN SOUTH SIKHOTE-ALIN (PACIFIC RUSSIA)

Vladimir V. Shamov[1], Igor V. Tokarev[2], Tatyana A. Mikhailik[3], Anna V. Kozachek[4]

*[1]Pacific Institute of Geography FEB RAS, Vladivostok, Russia; [2]Facility Centre for Roentgen and Diffraction Methods of Investigation, Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia; [3]V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia; [4]State Research Center "Arctic and Antarctic Research Institute", Saint-Petersburg, Russia*

vlshamov@yandex.ru

**Abstract.** The isotopic composition of natural water reflects its confinement to various links of the hydrological cycle, changing during phase transitions (evaporation, transpiration, condensation, freezing, thawing), as well as during the interaction of water with water-containing media (rocks, soils, air masses, biota, etc.). In the article, for the first time based on detailed field studies in the testbed small mountain river basins in 2013–2016, the intra-annual and inter-annual dynamics of the $^2$H and $^{18}$O isotopes in the main geographical types of water circulating in warm period in typical river basins of the mountainous country of Sikhote-Alin (Primorsky Krai, Russian Federation) are analyzed. We show that rain, river and soil waters at the catchments near the seacoast have a heavier isotopic composition. A preliminary conclusion is substantiated that in relatively humid years, the waters of the continental mountainous regions of Primorye are, on average, lighter in isotopic composition than those in the coastal regions by about 1.5 times. For coastal-marine river catchments, soil water and water of near-surface slope flows are almost indistinguishable in isotope ratio, while for continental catchments, soil water are close in $^{18}$O and $^2$H to river water, and

Shamov V.V., Tokarev I.V., Mikhailik T.A., Kozachek A.V. Summer-autumn variability of isotopes ($^2$H and $^{18}$O) in water at small mountain catchments in South Sikhote-Alin (Pacific Russia). *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2022, vol. 4, iss. 2, pp. 202–215. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2022.4.2.202.

с районами побережья приблизительно в 1,5 раза. Для речных водосборов, расположенных прибрежно-морских районах, почвенные воды и воды устойчивых приповерхностных склоновых потоков в изотопном отношении почти неразличимы, тогда как для континентальных водосборов почвенные воды близки по содержанию $^{18}O$ и $^{2}H$ к речным водам, а воды склоновых потоков отличаются чуть более легким, чем речные воды, изотопным составом. В целом близкие значения природных изотопов в почвенных и речных водах обоих районов подтверждают полученные ранее с помощью природных химических трассеров выводы о в целом преобладающей доли склоновых вод – почвенных вод и вод приповерхностных склоновых потоков – в питании малых горных рек Сихотэ-Алиня и, соответственно, относительно невысокий объем подземного питания и низкие значения доли дождевых вод в речном стоке.

**Ключевые слова:** влагооборот; изотопный состав; $^{18}O$; $^{2}H$; атмосферные, почвенные и речные воды; Дальний Восток России.

slope water differ in a slightly lighter isotopic composition. In general, close values of natural isotopes in soil and river water of the both studied areas confirm the conclusion obtained with natural chemical tracers about the prevailing total share of slope water – soil water and water of near-surface slope flows – in the feeding of small mountain rivers in the Sikhote-Alin mountains and, accordingly, relatively low groundwater recharge and low values of the share of rainwater in river flow.

**Keywords:** water cycle; isotopes; $^{18}O$; $^{2}H$; atmospheric, soil and river water; Pacific Russia.

## Введение

Изотопный состав природной воды уже давно рассматривается как индикатор ее приуроченности к различным звеньям гидрологического цикла [Gat, 1996; Aggrawal, Gat, Froehlich, 2005; Ферронский, Поляков, 2009; Sánchez-Murillo et al., 2015]. Наиболее существенным здесь является изменение изотопного состава воды как в процессе испарения с поверхности океана и других водных поверхностей, так и в процессе конденсации пара в атмосфере. Как результат, в метеорных (атмосферных) водах уменьшается количество тяжелых изотопов водорода и кислорода по сравнению с океаническими водами, при этом воды таких объектов, как озера, растения, почвы, где доля испарения (эвапотранспирации) в водном балансе велика, относительно обогащены такими изотопами. При прохождении через водоносные горизонты при неизменной окружающей температуре подземные воды характеризуются устойчивым изотопным составом; при повышении температуры взаимодействие воды с горными породами может привести к изменению ее изотопного состава. Отмеченные изменения в содержании изотопов в атмосферных, поверхностных, почвенных и грунтовых водах, а также в биоте применяются для характеристики процессов водообмена в речных бассейнах.

К настоящему времени имеются отрывочные данные о содержании природных изотопов в континентальных и морских водах Тихоокеанской России [Труфанов и др., 1975; Чудаева, Чудаев, Юрченко, 2008; Харитонова и др., 2012; Chelnokov et al., 2013; Харитонова и др., 2017]. Внутригодовая и межгодовая динамика изотопов $^{2}H$ и $^{18}O$ в основных географических типах вод, циркулирующих в пределах горных речных бассейнов данного региона, анализируется впервые.




**Рисунок 1.** Схема расположения районов исследований (пояснения в тексте).
**Figure 1.** The layout of study area.

## Характеристика районов исследований

В рамках программы натурных исследований формирования стока в процессе детальных гидролого-гидрохимических наблюдений на репрезентативных малых речных водосборах в южной части горной страны Сихотэ-Алинь пробы дождевой, почвенной и речной воды были массово исследованы на относительное содержание стабильных изотопов $\delta^2H$ и $\delta^{18}O$.

Один из районов исследований – условно названный континентальным – представляет собой часть территории Верхнеуссурийского биоценологического стационара Федерального научного центра биоразнообразия наземной биоты Северо-восточной Азии Дальневосточного отделения Российской академии наук. Стационар расположен в бассейне реки Правая Соколовка в верховьях реки Уссури (рисунок 1). В пределах его границ находятся три экспериментальных речных водосбора, на которых проводились наблюдения.

Данный речной бассейн находится в пределах Самаркинской подзоны Центральной структурно-формационной зоны Самаркинского террейна [Ханчук и др., 1995]. Наиболее молодые отложения, мощность которых достигает 600–650 м, представлены здесь в основном позднемеловыми эффузивами кислого состава. Верхняя трещиноватая зона, обусловленная процессами выветривания, прослеживается до глубины 30 м в долинах и более – на водоразделах. Глубже трещиноватость связана с разломами. Район относится к Сихотэ-Алинскому гидрогеологическому массиву, где широко распространены трещинные и трещинно-жильные подземные воды.

Рассматриваемая территория типична для среднегорного пояса Южного Сихотэ-Алиня и служит своеобразным эталоном южной тайги с господством широколиственно-кедровых и пихтово-еловых лесов. В диапазоне высот от 500 до 800–900 м над уровнем моря на аллювиальных отложениях распространены горно-долинные, а на склоновом делювии – горнолесные бурые почвы. В поясе высот от 800 до 1100 м под пихтово-еловыми лесами на

элювиальных и элювиально-делювиальных отложениях вершин водоразделов и склонов гор развиты буротаежные иллювиально-гумусовые группы типов почв. Высокая скелетность почв, рыхлое их сложение и крутые склоны способствуют интенсивному подповерхностному стоку [Boldeskul et al., 2016].

Климат рассматриваемого района влажный умеренно-холодный. Средняя годовая температура воздуха составляет плюс 0,7°С, с абсолютным максимумом (плюс 38°С) в июле-августе и абсолютным минимумом (минус 45°С) в январе. За год выпадает в среднем 780 мм осадков, более 80% из них – с апреля по октябрь. Максимальные суточные суммы осадков (до 200 мм) обусловлены выходом тропических циклонов во второй половине лета. Устойчивый снежный покров образуется в ноябре. Высота снежного покрова составляет 52–102 см при запасах воды в снеге 96–205 мм. Сезонная мерзлота в почве сохраняется в среднем в течение 206 дней, глубина промерзания в разные годы достигает 53–125 см [Кожевникова и др., 2014].

Второй район исследований представляет собой водосбор реки Падь Васькова, примыкающий к устьевому участку реки Рудная близ побережья Японского моря (Приморский край Российской Федерации) (рисунок 1). Данный район характеризует восточный макросклон южного Сихотэ-Алиня и расположен в пределах одной из крупных структурно-фациальных зон – Прибрежного антиклинория или Таухинского террейна [Ханчук и др., 1995]. Основная часть данной территории в геологическом отношении представлена эффузивами, интрузивами и вулканогенно-осадочными образованиями верхнего мела и палеогена. Эффузивы представлены комплексами пород среднего и кислого состава (кварцевые порфириты и риолиты, их лавы и туфы), интрузивные разности – гранитоидами палеогена [Аржанова, Елпатьевский, 1990].

По типу современного горного рельефа данный район представляет собой эрозионно-денудационные низкогорья с высотами до 539 м над уровнем моря (гора Камни) и субмеридиональным простиранием основных водоразделов. Рельеф преимущественно крутосклонный, сильно расчлененный с амплитудой относительных превышений до 200–250 м и средними уклонами 5–20°. Низкогорные элювиальные отложения представлены щебнисто-суглинистой фацией мощностью до 1–3 м и грубого механического состава. Склоновые отложения сложены в основном делювиальной, а также щебнисто-суглинистой фацией, реже осыпной и обвальной фациями. По гребням водоразделов, реже по склонам, встречаются выходы коренных пород. Речные долины достигают ширины 3–4 км, в них хорошо развиты высокая и низкая поймы, локально встречаются надпойменные террасы. Русловая фация представлена валунно-галечниковым материалом, пойменная – суглинками, супесями, песками.

Высокая щебнистость почвенного профиля обеспечивает высокую скважность и свободную инфильтрацию атмосферных осадков, при этом в условиях сильно расчлененного рельефа почвы элювиальных и трансэлювиальных ландшафтов испытывают лишь кратковременное переувлажнение [Аржанова, Елпатьевский, 1990]. На горных склонах в рыхлых отложениях на глубине 0,5–1,0 м встречаются невыраженные или слабо выраженные водные потоки, которые представляют собой устойчивые формы концентрации склонового стока [Тарбеева, Гарцман, 2017; Гарцман и др., 2020]. Во время обильных дождей эти потоки достигают силы, достаточной для пересортировки и выноса вниз по склону рыхлого материала и формирования первичных ложбин, хорошо врезанных в склон.

Климат прибрежного района исследований влажный умеренно-холодный муссонный с высокой степенью континентальности. Среднемесячная температура самого холодного месяца в году – января – составляет минус 12,9°С, самого теплого – августа – плюс 18,4°С. Годовая сумма осадков колеблется в пределах 600–850 мм. Для первой половины теплого периода характерны туманы, затяжные моросящие дожди малой интенсивности, снижение эффективной солнечной радиации до 50–60% от потенциальной. Для второй половины (июль –

сентябрь) типичны осадки ливневого характера с интенсивностью от 30 до 120 мм/сут.

## Исходный материал и методы

Отбор проб воды производился в октябре 2013 года и в июне–сентябре 2014, 2015 и 2016 годов. Пробы помещались в пластиковую или стеклянную посуду объемом от 2 до 10 мл с последующей герметизацией и хранением при температуре от 0 до +14ºС.

В результате массовых отборов признаны по условиям хранения надежными 348 нефильтрованных проб дождевых, почвенных (извлеченных с помощью вакуумных лизиметров с керамическими наконечниками) и речных вод для последующего их анализа на содержание природных изотопов – $^{18}O$ и $^{2}H(D)$.

Анализ изотопного состава образцов, отобранных в 2013 году, выполнялся на лазерном анализаторе изотопного состава воды Picarro L2120-i[1] в Лаборатории изменений климата и окружающей среды Арктического и антарктического научно-исследовательского института. Каждый образец измерялся один раз, через каждые пять измерений образцов выполнялись измерения рабочего стандарта лаборатории, близкого по изотопному составу к значениям измеряемых образцов. Некоторые случайно выбранные образцы (10% общего числа) для контроля качества измерений обрабатывались дважды. Воспроизводимость результатов составила 0,06‰ для $\delta^{18}O$ и 0,30‰ для $\delta^{2}H$.

Пробы воды, отобранные в 2014 году, обрабатывались в Тихоокеанском океанологическом институте ДВО РАН на лазерном анализаторе Picarro L-2130-i. При этом в качестве рабочих стандартов использовались стандарты МАГАТЭ. Воспроизводимость измерений, определенная путем повторного измерения проб, оказалась равной 0,04‰ для $\delta^{18}O$ и 0,5‰ для $\delta^{2}H$. В 2015 и 2016 годах анализ проб производился на лазерном анализаторе воды Picarro L-2120-i в Ресурсном центре «Геомодель» (Научный парк Санкт-Петербургского государственного университета). Неопределенность измерений составила ±0,12‰ по $\delta^{18}O$ и ±1,3‰ по $\delta^{2}H$, при этом в качестве рабочих стандартов использовались стандарты V-SMOW-2, GISP и LASP, USGS45 и USGS46.

Данные анализа представлены в форме отклонения доли от SMOW в промилле (‰).

## Результаты и обсуждение

Обобщенные данные исследований приведены в таблицах 1 и 2, а также на рисунках 2–4.

Из их анализа следует, что водосборы, расположенные вблизи морского побережья (бассейн реки Падь Васькова), отличаются заметно более тяжелым изотопным составом речных вод, вод приповерхностных склоновых потоков, а также почвенных вод в сравнении с континентальными водосборами Приморья (бассейн реки Правая Соколовка). Это связано с фракционирующим влиянием интенсивных процессов испарения и конденсации над поверхностью моря на изотопный состав вод прибрежных районов и подтверждается региональными данными, приведенными в [Ферронский, Поляков, 2009].

Изотопный состав дождевых и подкроновых (собранных под древесным пологом) вод в обоих районах при сравнительно небольшой выборке отличается большим разбросом и, как следствие, невысокой статистической надежностью. При этом изотопный состав атмосферных вод в среднем тяжелее по отношению к почвенным, а также речным и склоновым (приуроченных к предпочтительным путям стекания) водам. В относительно более сухие 2013 и 2014 годы содержание изотопов $^{18}O$ и $^{2}H$ в почвенных водах верховьев реки Правая Соколовка, в силу в среднем большего влияния испарения, испытывают больший диапазон колебаний и несколько выше в сравнении с пробами более влажных лет – 2015 и 2016 годов.

[1] PICARRO L2120-i δD/δ18O Isotopic Water Analyzer. 2012. URL: https://www.picarro.com/sites/default/files/L2120-i%20Datasheet.pdf.

**Таблица 1.** Осредненные показатели $\delta^{18}O$ и $\delta^{2}H$ в пробах природных вод малых речных бассейнов южного Сихотэ-Алиня.

**Table 1.** Averaged values of $\delta^{18}O$ и $\delta^{2}H$ in natural water samples from small stream catchments of the south Sikhote-Alin.

| **Речные воды $\delta^{18}O$, ‰ SMOW** | **Речные воды $\delta^{2}H$, ‰ SMOW** | **Склоновые грунтовые и родниковые воды $\delta^{18}O$, ‰ SMOW** | **Склоновые грунтовые и родниковые воды $\delta^{2}H$, ‰ SMOW** | **Почвенные воды $\delta^{18}O$, ‰ SMOW** | **Почвенные воды $\delta^{2}H$, ‰ SMOW** | **Атмосферные воды $\delta^{18}O$, ‰ SMOW** | **Атмосферные воды $\delta^{2}H$, ‰ SMOW** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| река Правая Соколовка, верховья N 44°02', E 134°12' | | | | | | | |
| -14,36 | -103,66 | -14,75 | -105,45 | -14,30 | -103,10 | -8,05 | -59,67 |
| река Падь Васькова N 44°20', E 135°47' | | | | | | | |
| -10,29 | -74,08 | -10,13 | -70,81 | -10,08 | -70,67 | -6,667 | -49 |

**Таблица 2.** Аппроксимация связи $\delta^{2}H$ и $\delta^{18}O$ для вод малых речных бассейнов южного Сихотэ-Алиня.

**Table 2.** Approximation of $\delta^{2}H$– $\delta^{18}O$ relation in the water sampled from small stream catchments of the south Sikhote-Alin.

| **Характеристика проб воды** | **Уравнение регрессии $\delta^{2}H = f(\delta^{18}O)$, ‰** | **Коэффициент детерминации, $R^2$** |
|---|---|---|
| GMWL – Глобальная линия метеорных вод | y = 8x + 10 | — |
| RMWL – Региональная линия метеорных вод [Ферронский, Поляков, 2009] | Y ~ 8x | — |
| река Правая Соколовка, верховья | | |
| Дождь, подкроновые воды | y = 6,8095x - 4,8503 | 0,966 |
| Река | y = 6,8145x - 5,8068 | 0,565 |
| Почвенные воды | y = 5,343x - 26,711 | 0,640 |
| Склоновые грунтовые потоки | y = 3,9105x - 47,757 | 0,195 |
| река Падь Васькова | | |
| Дождь | y = 5,9801x - 9,1329 | 0,997 |
| Река, болото в верховьях | y = 5,2374x - 20,204 | 0,442 |
| Почвенные воды | y = 2,5441x - 45,014 | 0,506 |
| Склоновые грунтовые потоки | y = 6,7515x - 2,4115 | 0,298 |

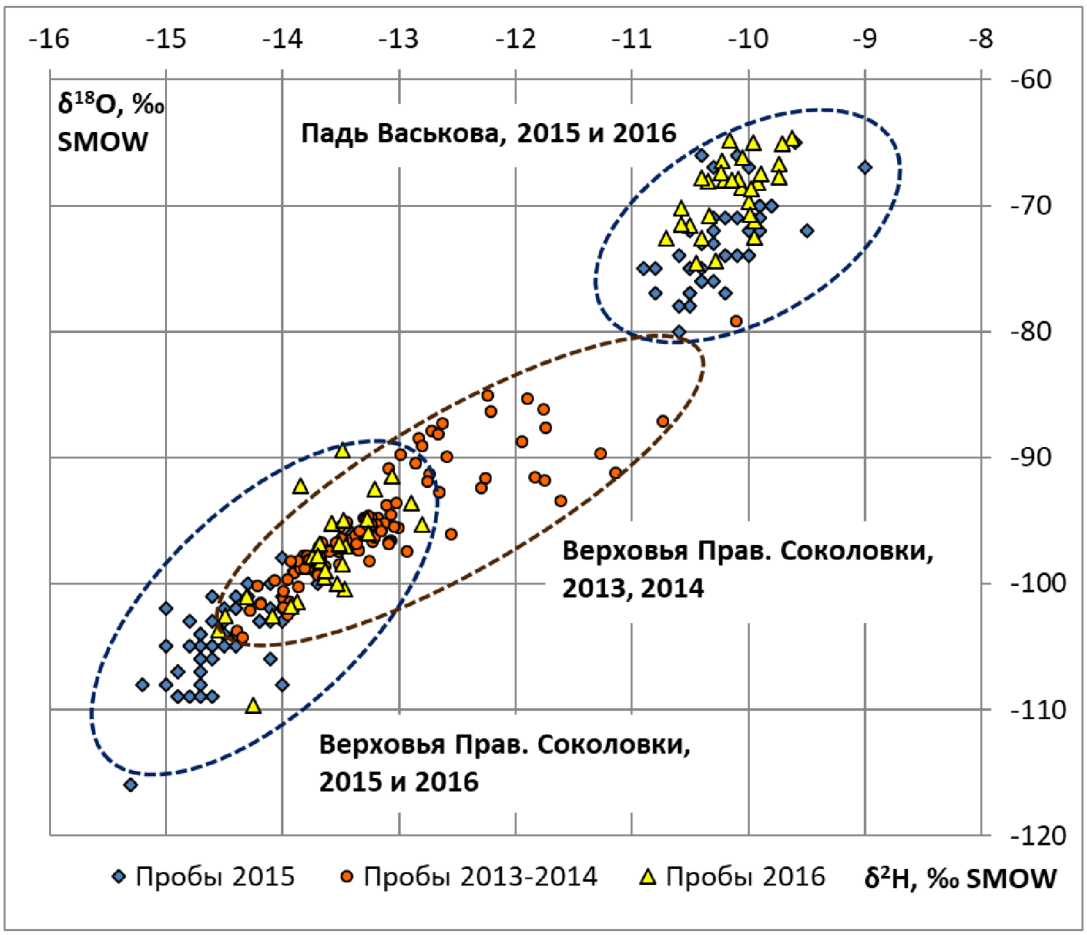



**Рисунок 2.** Соотношение $\delta^{18}O$ и $\delta^{2}H$ в пробах речных вод в бассейнах рек Правая Соколовка и Падь Васькова.
**Figure 2.** The $\delta^{18}O$–$\delta^{2}H$ relation in the stream water sampled from the Pravaya Sokolovka River and Pad' Vas'kova River.

Изменение наклона прямой, аппроксимирующей связь $\delta^{18}O$ и $\delta^{2}H$, указывает на возрастание содержания $^{18}O$ при одном и том же уровне $^{2}H$ в почвенных водах по сравнению с дождевыми водами (рисунок 3). Наклон меняется в пределах одного района при переходе от проб атмосферных вод к почвенным и склоновым водам. Обогащение подземных вод изотопом $^{18}O$, скорее всего, обусловлено обменными процессами воды с подстилающими силикатными породами при агрессивном воздействии на них углекислоты [Ветштейн, 1982] и, вероятно, органических кислот, в достаточном количестве присутствующих в почвенных растворах.

Для почвенных вод континентального района возрастание доли тяжелых изотопов кислорода может быть обусловлено в первую очередь процессами активного физиологического испарения (транспирации) во время вегетации. На юге Сихотэ-Алиня в жаркие сухие дни транспирация по объему в среднем превосходит сток в 5–6 раз [Лупаков и др., 2021]. С испарением связано изотопное фракционирование, при котором молекулы воды, включающие изотоп $^{16}O$, легче и, следовательно, улетучиваются в атмосферу в относительно большем объеме, чем молекулы с изотопом $^{18}O$ [Moravec et al., 2010; Klaus et al., 2015].

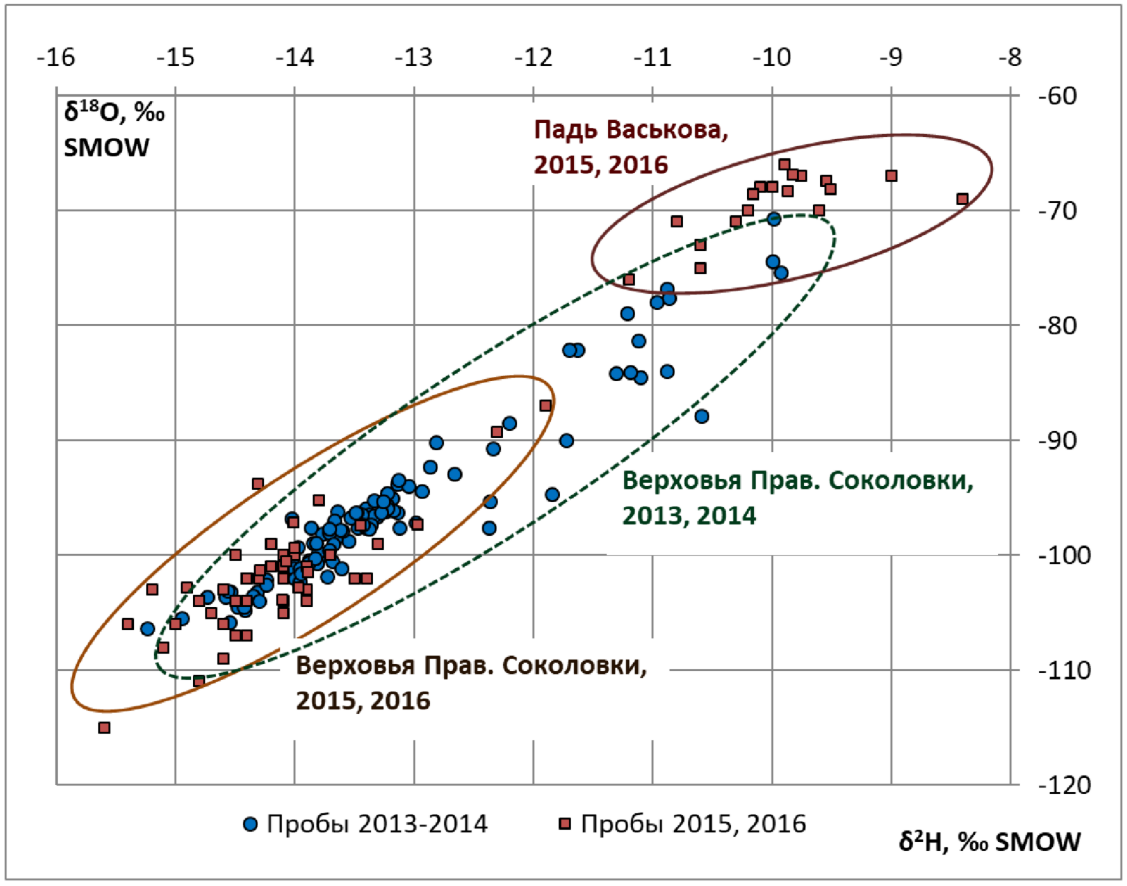



**Рисунок 3.** Соотношение $\delta^{18}O$ и $\delta^{2}H$ в пробах почвенных вод в бассейнах рек Правая Соколовка и Падь Васькова.

**Figure 3.** The $\delta^{18}O$–$\delta^{2}H$ relation in the soil (lysimetric) water sampled from the Pravaya Sokolovka River and Pad' Vas'kova River.

В зависимости от соотношения долей дождевых и почвенных вод в объеме речного стока меняется изотопный состав речных проб, отобранных в период формирования дождевого паводка. При этом сильно изменяется амплитуда и направленность колебания данного состава как от паводка к паводку, так и в пределах одного паводкового цикла, что указывает на сложность генетической структуры паводочного руслового стока, заметно меняющейся даже на непродолжительных интервалах времени [Губарева и др., 2019].

Основной объем среднего по силе дождевого паводка сопровождается обычно общим снижением количества тяжелых изотопов в речных пробах (например, $\delta^{18}O$ – от -11 до -14‰), очевидно, вследствие высокой доли почвенных вод (склоновых подповерхностных вод) в объеме паводкового стока [Губарева и др., 2019], более легких по изотопному составу, а также на фоне снижения интенсивности испарения с водосбора в период формирования паводка.

Во время длительной летней межени, которая нередко сопровождается полным истощением руслового стока даже на некоторых мелководных участках рек II порядка, в пробах из первичных водотоков содержание $\delta^{18}O$ возрастает от -13,5 до -10‰, что, очевидно, можно объяснить доминированием на водосборах процессов эвапотранспирации и связанного с ними изотопного фракционирования. Данное утяжеление изотопного состава, по некоторым данным для рек I порядка, бывает более значительным, чем таковое, вызванное выпадением на в русла их водосборов обогащенных изотопами дождевых вод, вызванных морскими циклонами ($\delta^{18}O$ – от -14 до -12‰).

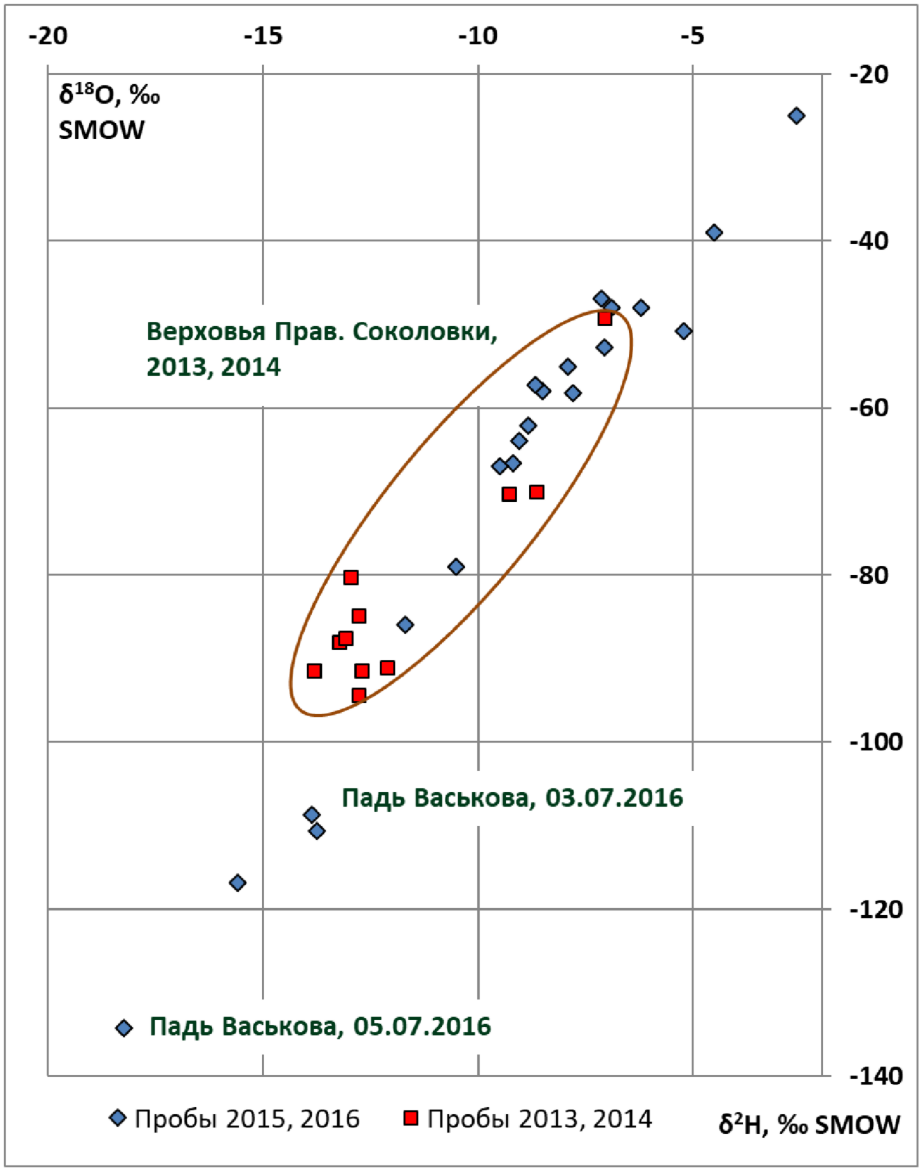



**Рисунок 4.** Соотношение $\delta^{18}O$ и $\delta^{2}H$ в пробах дождевых вод в бассейнах рек Правая Соколовка и Падь Васькова.
**Figure 4.** The δ18O–δ2H relation in the rainwater sampled from the Pravaya Sokolovka River and Pad' Vas'kova River.

В осеннюю межень, к концу сентября – началу октября, приток тепла сокращается, вегетационный цикл прекращается, при этом интенсивность физиологического и физического испарения существенно уменьшается. Изотопный состав речных вод при этом практически мало отличим от состава речных проб, отобранных в периоды прохождения паводка и значительного притока в русла рек почвенных вод.

## Заключение

Для водосборов южного Сихотэ-Алиня, расположенных вблизи побережья Японского моря, характерен более тяжелый изотопный состав дождевых, речных и почвенных вод. Это связано с влиянием изотопного фракционирования, обусловленного процессами испарения и конденсации над поверхностью моря. Воды континентальных горных районов Приморья в целом легче по изотопному составу в сравнении с районами побережья приблизительно в 1,5 раза. Атмосферные воды в пределах

исследованных районов в отличие от речных и почвенных вод не образуют непересекающиеся группы по изотопному составу. Для водосборов, расположенных вблизи морского побережья, почвенные воды и воды склоновых предпочтительных водопроводящих путей в изотопном отношении практически неразличимы, тогда как для континентальных водосборов почвенные воды в этом смысле близки к речным водам, а склоновые – отличаются более легким изотопным составом. В целом близкие значения долей природных изотопов в почвенных и речных водах водосборов в обоих районах исследований отражают определяющую в среднем долю неглубоких почвенных вод в питании малых рек района и, соответственно, низкие значения долей базисного стока (подземного питания) и поверхностных (дождевых) вод в речном стоке.

**Благодарности**

Работа выполнена в рамках темы № 122020900184-5 Государственного задания в части научно-исследовательской работы Тихоокеанского института географии Дальневосточного отделения Российской академии наук на период с 2019 по 2021 год при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты №№ 17-05-00217, 19-05-00326).

Авторы выражают благодарность д.г.н. Б.И. Гарцману, к.г.н. Т.С. Губаревой, к.б.н. Н.К. Кожевниковой, к.г.н. С.Ю. Лупакову, Е.А. Шекману и Д.А. Касурову за активное участие в отборах проб воды.

**Литература**

*Аржанова В.С., Елпатьевский П.В.* Геохимия ландшафтов и техногенез. М.: Наука, 1990. 194 с.

*Ветштейн В.Е.* Изотопы кислорода и водорода природных вод СССР. Л.: Недра, 1982. 216 с.

*Гарцман Б.И., Губарева Т.С., Лупаков С.Ю., Орляковский А.В., Тарбеева А.М., Шамов В.В., Шекман Е.А.* Формы линейной организации склонового стока в среднегорье (на примере Сихотэ-Алиня) // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 2. С. 123–132. DOI: 10.31857/S0321059620020042.

*Губарева Т.С., Гарцман Б.И., Шамов В.В., Луценко Т.Н., Болдескул А.Г., Кожевникова Н.К., Лупаков С.Ю.* Компоненты стока малых водосборов Сихотэ-Алиня: обобщение результатов полевых измерений и трассерного моделирования // Известия Российской академии наук. Серия географическая.

**Acknowledgments**

The work was carried out within the framework of topic No. 122020900184-5 of the State Assignment in terms of research of the Pacific Institute of Geography, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences for 2019–2021 with the financial support of the RFBR (projects No. 17-05-00217 and 19-05-00326).

The authors are grateful to DSc. B.I. Gartsman, Ph.D. T.S. Gubareva, Ph.D. N.K. Kozhevnikova, Ph.D. S.Yu. Lupakov, E.A. Shekman and D.A. Kasurov for active participation in water sampling.

**References**

Aggrawal P.K., Gat J.R., Froehlich K.F.O. *Isotopes in the water cycle: past, present and future of a developing science*. Netherlands, Springer, IAEA, 2005. 381 p.

Arzhanova V.S., Elpat'evskii P.V. *Geokhimiya landshaftov i tekhnogenez. [Geochemistry of landscapes and technogenesis]*. Moscow, Publ. Nauka, 1990. 194 p. (In Russian).

Boldeskul A.G., Shamov V.V., Gartsman B.I., Kozhevnikova N.K., Gubareva T.S., Lutsenko T.N. Chemical composition of geographical types of the small river basin waters (Central Sikhote-Alin Mountains, Pacific Asia). *Water Resources*, 2016, vol. 43, iss. 1, pp. 145–157. DOI: 10.1134/S0097807816010048.

Chelnokov G., Kharitionova N., Bragin I., Vasil'eva M. Deuterium, oxygen-18 and tritium in precipitation, surface and groundwater in the Far East of Russia. *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Water-Rock*

2019. № 6. С. 126–140. DOI: 10.31857/S2587-556620196126-140.

*Кожевникова Н.К., Болдескул А.Г., Шамов В.В., Гарцман Б.И., Губарева Т.С.* Особенности формирования химического состава природных вод в горных лесных бассейнах // 6-ая конференция «Чтения памяти В.Я. Леванидова» (г. Владивосток, Россия, 19 – 21 марта 2014 года). Владивосток: Дальнаука, 2014. № 6. С. 316–323.

*Лупаков С.Ю., Губарева Т.С., Шамов В.В., Рубцов А.В., Гарцман Б.И., Бугаец А.Н., Омелько А.М.* Возможности использования данных о стволовом сокодвижении в гидрологическом моделировании // Тихоокеанская география. 2021. № 2 (6). С. 54–64. DOI: 10.35735/tig.2021.6.2.005.

*Тарбеева А.М., Гарцман Б.И.* Морфогенез первичных звеньев гидрографической сети: натурные исследования в центральном Сихотэ-Алине // География и природные ресурсы. 2017. № 4. С. 114–121. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2017-4(114-121).

*Труфанов А.И., Иванов В.Г., Караванов К.П., Кислицын Л.В.* Дейтерий и процессы формирования природных вод юга Дальнего Востока // Ресурсы и химический состав природных вод Дальнего Востока / Под ред. А.И. Ивлева / Вопросы географии Дальнего Востока. Сборник 15. Хабаровск: Хабаровский комплексный научно-исследовательский институт, 1975. С. 129–136.

*Ферронский В.И., Поляков В.А.* Изотопия гидросферы Земли. М.: Научный мир, 2009. 632 с.

*Ханчук А.И., Раткин В.В., Рязанцева М.Д., Голозубов В.В., Гонохова Н.Г.* Геология и полезные ископаемые Приморского края: очерк. Владивосток: Дальнаука, 1995. 68 с.

*Харитонова Н.А., Челноков Г.А., Брагин И.В., Вах Е.А.* Изотопный состав природных вод юга Дальнего Востока России // Тихоокеанская геология. 2012. Т. 31. № 2. С. 75–86.

*Харитонова Н.А., Шварцев С.Л., Лепокурова О.Е., Челноков Г.А.* Уникальные

*Interaction, WRI 14 (9-14 June 2013, Avignon, France)*, 2013, vol. 7, pp. 151–154. DOI: 10.1016/j.proeps.2013.03.209.

Chudaeva V.A., Yurchenko S.G., Chudaev O.V. Chemical and isotopic ($^{18}O/^{16}O$ and $D/^{1}H$) composition of groundwaters of central and southern Primorye. *Russian Journal of Pacific Geology*, 2008, vol. 2, iss. 6, pp. 512–520. DOI: 10.1134/S1819714008060055. (Russ. ed.: Chudaeva V.A., Chudaev O.V., Yurchenko S.G. Khimicheskii i izotopnyi ($^{18}O/^{16}O$ i $D/^{1}H$) sostav gruntovykh vod tsentral'nogo i yuzhnogo Primor'ya. *Tikhookeanskaya geologiya*, 2008, vol. 27, iss. 6, pp. 57–64).

Ferronskii V.I., Polyakov V.A. *Izotopiya gidrosfery Zemli [Isotopy of the Earth's hydrosphere]*. Moscow, Publ. Nauchnyi mir, 2009. 632 p. (In Russian).

Gartsman B.I., Gubareva T.S., Lupakov S.Y., Shamov V.V., Shekman E.A., Orlyakovskii A.V., Tarbeeva A.M. The forms of linear structure of overland flow in medium-height mountain regions: case study of the Sikhote Alin. *Water Resources*, 2020, vol. 47, iss. 2, pp. 179–188. DOI: 10.1134/S0097807820020049. (Russ. ed.: Gartsman B.I., Gubareva T.S., Lupakov S.Yu., Orlyakovskii A.V., Tarbeeva A.M., Shamov V.V., Shekman E.A. Formy lineinoi organizatsii sklonovogo stoka v srednegor'e (na primere Sikhote-Alinya). *Vodnye resursy,* 2020, vol. 47, iss. 2, pp. 123–132. DOI: 10.31857/S0321059620020042).

Gat J.R. Oxygen and hydrogen isotopes in the hydrologic cycle. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1996, vol. 24, pp. 225–262. DOI: 10.1146/annurev.earth.24.1.225.

Gubareva T.S., Gartsman B.I., Shamov V.V., Lutsenko T.N., Boldeskul A.G., Kozhevnikova N.K., Lupakov S.Yu. Komponenty stoka malykh vodosborov Sikhote-Alinya: obobshchenie rezul'tatov polevykh izmerenii i trassernogo modelirovaniya [Runoff components of small catchments in Sikhote-Alin: summarizing the results of field measurements and tracer modeling]. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya [Izvestiya Rossiiskoi Akademii*

углекислые минеральные воды месторождения Мухен (Хабаровский край): состав и генезис // Доклады Академии наук. 2017. Т. 475. № 6. С. 685–690. DOI: 10.7868/S0869565217240185.

*Чудаева В.А., Чудаев О.В., Юрченко С.Г.* Химический и изотопный ($^{18}O/^{16}O$ и $D/^{1}H$) состав грунтовых вод центрального и южного Приморья // Тихоокеанская геология. 2008. Т. 27. № 6. С. 57–64.

*Aggrawal P.K., Gat J.R., Froehlich K.F.O.* Isotopes in the water cycle: past, present and future of a developing science. Netherlands: Springer, IAEA, 2005. 381 p.

*Boldeskul A.G., Shamov V.V., Gartsman B.I., Kozhevnikova N.K., Gubareva T.S., Lutsenko T.N.* Chemical composition of geographical types of the small river basin waters (Central Sikhote-Alin Mountains, Pacific Asia) // Water Resources. 2016. Vol. 43. № 1. P. 145–157. DOI: 10.1134/S0097807816010048.

*Chelnokov G., Kharitionova N., Bragin I., Vasil'eva M.* Deuterium, oxygen-18 and tritium in precipitation, surface and groundwater in the Far East of Russia // Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Water-Rock Interaction, WRI 14 (9-14 June 2013, Avignon, France). 2013. Vol. 7. P. 151–154. DOI: 10.1016/j.proeps.2013.03.209.

*Gat J.R.* Oxygen and hydrogen isotopes in the hydrologic cycle // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 1996. Vol. 24. P. 225–262. DOI: 10.1146/annurev.earth.24.1.225.

*Klaus J., McDonnell J.J., Jackson C.R., Du E., Griffiths N.A.* Where does streamwater come from in low-relief forested watersheds? A dual-isotope approach // Hydrology and Earth System Sciences. 2015. Vol. 19. № 1. P. 125–135. DOI: 10.5194/hess-19-125-2015.

*Moravec B.G., Keller C.K., Smith J.L., Allen-King R.M., Goodwin A.J., Fairley J.P., Larson P.B.* Oxygen-18 dynamics in precipitation and streamflow in a semi-arid agricultural watershed, Eastern Washington, USA // Hydrological Processes. 2010. Vol. 24. № 4. P. 446–460. DOI: 10.1002/hyp.7515.

*Nauk. Geographic series]*, 2019, iss. 6, pp. 126–140. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.31857/S2587-556620196126-140.

Khanchuk A.I., Ratkin V.V., Ryazantseva M.D., Golozubov V.V., Gonokhova N.G. *Geologiya i poleznye iskopaemye Primorskogo kraya: ocherk [Geology and minerals of Primorsky Krai: an essay]*. Vladivostok, Publ. Dal'nauka, 1995. 68 p. (In Russian).

Kharitonova N.A., Chelnokov G.A., Bragin I.V., Vakh E.A. Izotopnyi sostav prirodnykh vod yuga Dal'nego Vostoka Rossii [Isotope composition of natural waters of the southern Far East, Russia]. *Tikhookeanskaya geologiya [Russian Journal of Pacific Geology]*, 2012, vol. 31, iss. 2, pp. 75–86. (In Russian; abstract in English).

Kharitonova N.A., Shvartsev S.L., Lepokurova O.E., Chelnokov G.A. Unique CO2–saturated mineral waters of the Mukhen deposit (Khabarovsk Krai): Composition and genesis. *Doklady Earth Sciences*, 2017, vol. 475, iss. 2, pp. 953–957. DOI: 10.1134/S1028334X17080220. (Russ. ed.: Kharitonova N.A., Shvartsev S.L., Lepokurova O.E., Chelnokov G.A. Unikal'nye uglekislye mineral'nye vody mestorozhdeniya Mukhen (Khabarovskii krai): sostav i genezis. *Doklady Akademii nauk,* 2017, vol. 475, iss. 6, pp. 685–690. DOI: 10.7868/S0869565217240185).

Klaus J., McDonnell J.J., Jackson C.R., Du E., Griffiths N.A. Where does streamwater come from in low-relief forested watersheds? A dual-isotope approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2015, vol. 19, iss. 1, pp. 125–135. DOI: 10.5194/hess-19-125-2015.

Kozhevnikova N.K., Boldeskul A.G., Shamov V.V., Gartsman B.I., Gubareva *T.S. Osobennosti formirovaniya khimicheskogo sostava prirodnykh vod v gornykh lesnykh basseinakh [Features of the formation of the chemical composition of natural waters in mountain forest basins]. Materialy 6-oi konferentsii «Chteniya pamyati V.Ya. Levanidova» (Vladivostok, Rossiya, 19 – 21 marta 2014) [Procceedings of Vladimir Ya.L. Biennial Memorial Meetings. Vol. 6 (Vladivostok, Russia, March, 19–21, 2014]*. Vladivostok, Publ. Dalnauka, 2014, pp. 316–323. (In Russian).

*Sánchez-Murillo R., Brooks E.S., Elliot W.J., Boll J.* Isotope hydrology and baseflow geochemistry in natural and human-altered watersheds in the Inland Pacific Northwest, USA // Isotopes in Environmental and Health Studies. 2015. Vol. 51. № 2. P. 1–24. DOI: 10.1080/10256016.2015.1008468.

Lupakov S.Yu., Gubareva T.S., Shamov V.V., Rubtsov A.V., Gartsman B.I., Bugaets A.N., Omelko A.M. Vozmozhnosti ispol'zovaniya dannykh o stvolovom sokodvizhenii v gidrologicheskom modelirovanii [Aplicability of sap flow data in hydrological modeling]. *Tikhookeanskaya geografiya [Pacific Geography Journal]*, 2021, iss. 2, pp. 54–64. DOI: 10.35735/tig.2021.6.2.005. (In Russian; abstract in English).

Moravec B.G., Keller C.K., Smith J.L., Allen-King R.M., Goodwin A.J., Fairley J.P., Larson P.B. Oxygen-18 dynamics in precipitation and streamflow in a semi-arid agricultural watershed, Eastern Washington, USA. *Hydrological Processes,* 2010, vol. 24, iss. 4, pp. 446–460. DOI: 10.1002/hyp.7515.

Sánchez-Murillo R., Brooks E.S., Elliot W.J., Boll J. Isotope hydrology and baseflow geochemistry in natural and human-altered watersheds in the Inland Pacific Northwest, USA. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 2015, vol. 51, iss. 2, pp. 1–24. DOI: 10.1080/10256016.2015.1008468.

Tarbeeva A.M., Gartsman B.I. Morfogenez pervichnykh zven'ev gidrograficheskoi seti: naturnye issledovaniya v tsentral'nom Sikhote-Aline [Morphogenesis of primary components of the hydrographic network: field investigations in central Sikhote-Alin]. G*eografiya i prirodnye resursy [Geography and natural resources],* 2017, iss. 4, pp. 114–121. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2017-4(114-121). (In Russian; abstract in English).

Trufanov A.I., Ivanov V.G., Karavanov K.P., Kislitsyn L.V. Deiterii i protsessy formirovaniya prirodnykh vod yuga Dal'nego Vostoka [Deuterium and the processes of formation of natural waters in the south of the Far East]. In Ivlev A.I. (ed.) *Resursy i khimicheskii sostav prirodnykh vod Dal'nego Vostoka [Resources and chemical composition of natural waters of the Far East]. Voprosy geografii Dal'nego Vostoka. Sbornik 15 [Questions of the geography of the Far East. Issue 15]*. Khabarovsk, Publ. of Khabarovskii kompleksnyi nauchno-issledovatel'skii institut, 1975, pp. 129–136. (In Russian).

Vetshtein V.E. *Izotopy kisloroda i vodoroda prirodnykh vod SSSR [Isotopes of oxygen and hydrogen in natural waters of the USSR]*. Leningrad, Publ. Nedra, 1982. 216 p. (In Russian).

# 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. Научные дискуссии
9. Наследие
10. 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.

**Отсылка на затекстовые библиографические ссылки** приводится по тексту статьи в квадратных скобках путем упоминания всех авторов (при отсылке к источнику с 1-3 авторами), либо первого автора и слов «и др.» («et al.») (при отсылке к источнику с 4 и более авторами) и года издания. Ссылки на несколько публикаций одного автора за один год помечаются добавлением буквы к году издания. В случае отсылки на несколько источников, они приводятся в хронологическом порядке и разделяются точкой с запятой.

Форматы оформления основных видов затекстовых библиографических ссылок:

Ссылка на книгу: *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:

Ссылки на диссертацию или автореферат: *Фамилия И.О.* Заглавие диссертации. Тип диссертации. Место издания (город), год. Количество страниц в диссертации. DOI:

Ссылки на статью 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:

Ссылки на статью в периодическом издании: *Фамилия И.О.* Заглавие статьи // Заглавие журнала. Год. Том. №. Страницы статьи. DOI:

Ссылки на 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:

Ссылки на электронный источник: *Фамилия И.О.* Заглавие материала [Электронный ресурс]: сведения, относящиеся к заглавию // Заглавие интернет-источника. Год создания ресурса. URL: адрес статьи (дата обращения: 01.01.2013).

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 (содержащая, как транслитерацию, так и перевод на английский язык); 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. Scientific discussions
9. Heritage
10. 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** in the text by last name and year in square brackets. If reference consist not more than three authors, you should place in text all author. If there are more than four authors - place in brackets the first author and words "et al." and not forget about year of publishing. If you need several reference cite in one place of text - please separate each reference by semicolons. If you use several references of one author in the same published year - you must separate it by letter near the year in reference list and in text.

**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, pp. 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. *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: М.М. Кадацкая

На обложке фото А.Х. Хайдарова,
рисунки Н.А. Казакова

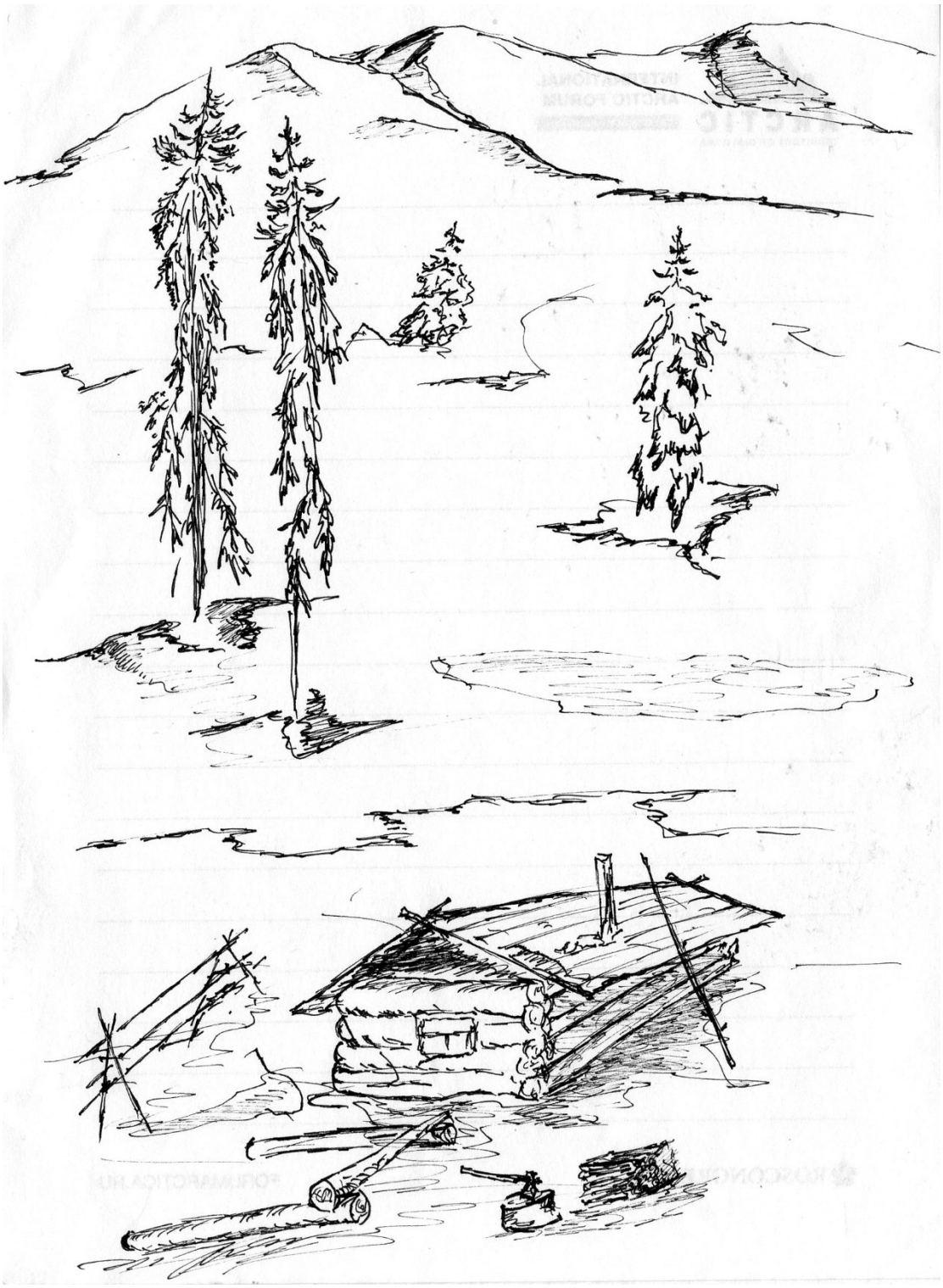
Подписано в печать 02.12.2022. Формат: 60x84/8
Бумага: офсетная. Печать плоская
Усл. печ. л. 19,2. Тираж 30 экз. Заказ № ____
Выход в свет __.__.____

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






© 2022 «Гидросфера. Опасные процессы и явления». Все права защищены.