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

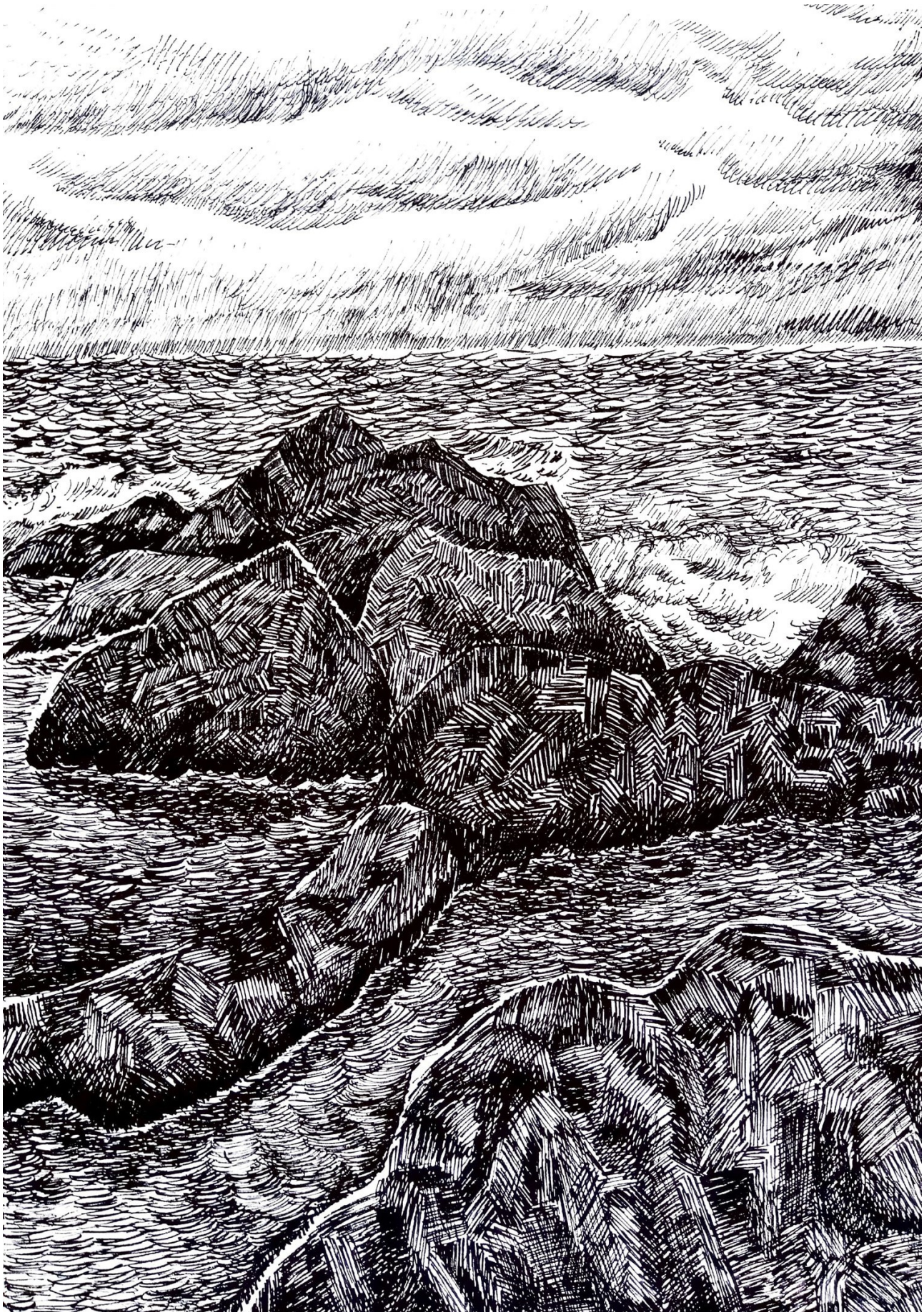
ГИДРОСФЕРА

ОПАСНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ



www.hydro-sphere.ru

Том 5 Выпуск 3



Загадская Елизавета. *Прибой*

ГИДРОСФЕРА. ОПАСНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ

Том 5, Выпуск 3

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, главный научный сотрудник, 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 5, Issue 3

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, Chief Researcher of the Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences, Head of the Department of of Hydrology of River Basins (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)

докт. геогр. наук **Б.И. Гарцман**, Институт водных проблем Российской академии наук, заведующий лабораторией гидрологии наводнений (г. Москва, Россия)

член-корреспондент РАН **А.Н. Гельфан**, Институт водных проблем Российской академии наук, главный научный сотрудник, 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)

Редакционная коллегия

докт. биол. наук **В.Н. Безносов**, Научно-производ-ственное объединение «Гидротехпроект», главный научный сотрудник (г. Санкт-Петербург, Россия)

докт. геогр. наук **В.П. Благовещенский**, Институт географии Республики Казахстан, заведующий лабораторией природных опасностей (г. Алматы, Казахстан)

докт. физ.-мат. наук **Ф.Ф. Брюхань**, Научно-производственное объединение «Гидротехпроект», руководитель проектов (г. Санкт-Петербург, Россия)

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

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

член-корреспондент РАН **Е.Ж. Гармаев**, Байкальский институт природопользования

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)

Boris I. Gartsman, Doctor of Science, Head of Flood Hydrology Department of Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)

Alexander N. Gelfan, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Chief Researcher of the Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences, Head of the Department of of Hydrology of River Basins (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)

Editorial Board

Victor N. Beznosov, Doctor of Science, Principal Researcher of the Scientific Production Association «Gidrotechproekt» (Saint-Petersburg, Russia)

Victor P. Blagovechshenskiy, Doctor of Science, Head of the Laboratory of Natural Hazards, Institute of Geography of the Republic of Kazakhstan (Almaty, Kazakhstan)

Fedor F. Bryukhan, Doctor of Science, Principal Researcher of the Scientific Production Association «Gidrotechproekt» (Saint-Petersburg, Russia)

Sergey S. Chernomorets, Associate Professor, Senior Researcher of the Laboratory of Snow Avalanches and Debris Flows of the Lomonosov Moscow State University, and President of the Debris Flow Association (Moscow, Russia)

Pavel A. Chernous, Ph.D., Leading Researcher of the Laboratory of Exogenous Geodynamic Processes and Snow Cover of the Special Design Bureau for Marine Research Automation Tools of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

Сибирского отделения Российской академии наук, директор (г. Улан-Удэ, 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)
член-корреспондент РАН **А.И. Зайцев**, Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований Дальневосточного отделе-ния Российской академии наук, заведующий ла-бораторией 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 Беларуси **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)
академик НАН РК **А.Р. Медеу**, Институт географии Республики Казахстан, директор (г. Алматы, Казахстан)
докт. геогр. наук **Р.Я. Миньковская**, Морской гидрофизический институт РАН, старший научный сотрудник отдела гидрофизики шельфа (г. Севастополь, Россия)

(Yuzhno-Sakhalinsk, Russia)
Sven Fuchs, Doctor of Sciences, Deputy of Head of the Institute of Mountain Risk Engineering of the BOKU University (Vienna, Austria)
Endon Zh. Garmaev, 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)
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)
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)
Rosa Ya. Minkovskaya, Doctor of Science, Senior Researcher of the Shelf Hydrophysics Department of the Marine Hydrophysical Institute of the Russian Academy of Sciences (Sevastopol, Russia)

проф. **К. Нишимура**, Японская ассоциации снега и льда, президент (г. Токио, Япония)
член-корреспондент РАН **А.В. Панин**, Институт географии Российской академии наук, заместитель директора по научной работе (г. Москва, Россия)
академик НАН РК **И.В. Северский**, 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. геол-мин. наук **В.Е. Тумской**, Институт мерзлотоведения имени П.И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук, ведущий научный сотрудник лаборатории общей геокриологии (г. Якутск, Россия)
докт. техн. наук, проф. **С.А. Угрюмов**, Санкт-Петербургский лесотехнический университет им. С.М. Кирова, заведующий кафедрой (г. Санкт-Петербург, Россия)
докт. **С. Фукс**, Институт горных рисков Университета природных ресурсов и наук о жизни, заместитель директора (г. Вена, Австрия)
канд. геогр. наук, доц. **С.С**. **Черноморец**, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, старший научный сотрудник лаборатории снежных лавин и селей географического факультета, президент Селевой ассоциации (г. Москва, Россия)
канд. геогр. наук **П.А. Черноус**, Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований Дальневосточного отделения Российской академии наук, ведущий научный сотрудник лаборатории экзогенных геодинамических процессов и снежного покрова (г. Южно-Сахалинск, Россия)

Kouichi Nishimura, Professor, President of Japanese Society of Snow and Ice (Tokyo, Japan)
Andrey V. Panin, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Scientific Director of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)
Igor V. Severskiy, Academician of the National Academy of Sciences of Kazakhstan, Scientific leader of 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)
Vladimir E. Tumskoy, Ph.D., Leading Research Scientist of the Laboratory of General Geocryology of the Melnikov Permafrost Institute Siberian branch of the Russian Academy of Sciences (Yakutsk, Russia)
Sergey A. Ugryumov, Professor, Doctor of Science Head of department at St. Petersburg Forestry University named after. C.M. Kirov (St. Petersburg, Russia)
Tatiana A. Vinogradova, Associate Professor, Senior Researcher 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)
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)

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)

Andrey I. Zaitsev, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, 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 **Круковской Ольги Юрьевны**, e-mail info@hydro-sphere.ru.
Сведения о вышедших номерах и условиях подписки на сайте журнала: www.hydro-sphere.ru.
Свидетельство о регистрации СМИ **ПИ № ФС 77-76914** от 11.10.2019.

Technical editor

Information on materials accepted for publication can be obtained on the journal's website or by e-mail info@hydro-sphere.ru to technical editor **Olga Krukowskaya**.
Information about the issues and subscription conditions on the journal website: www.hydro-sphere.ru.
Certificate of registration as the media **ПИ No ФС 77-76914** from 11.10.2019.

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

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

МЕТОДЫ, МОДЕЛИ И ТЕХНОЛОГИИ 228

Оценка качества моделирования и прогнозирования в гидрологии – рассуждение о методе Б. И. Гарцман 228

Процессы формирования стока рек криолитозоны в условиях горнодобывающей деятельности в речных долинах (на примере добычи золота в бассейне р. Сусуман, Магаданская область) П. А. Никитина, А. Н. Шихов, О. М. Макарьева, А. А. Землянскова, Н. В. Нестерова 244

Об аппроксимации зависимости сопротивления грунта сдвигу от нормального давления А. Ю. Виноградов, В. А. Обязов 256

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ И ОПАСНОСТИ В ГИДРОСФЕРЕ 264

Инвазии теплолюбивой водной растительности как угроза чрезвычайной ситуации на объектах атомной энергетики В. Н. Безносов, А. Л. Суздалева 264

Эколого-хозяйственные риски водопользования в условиях трансформации климата и водного режима В. А. Дмитриева, С. Хатунгимана 278

Обеспечение мониторинга подземных и поверхностных вод в районе размещения Нововоронежской АЭС с целью оценки последствий миграции радионуклидов из хранилища радиоактивных отходов (1985 г.) Д. А. Шаров, А. С. Коротков, И. В. Пырков, В. П. Поваров, А. П. Щукин, С. В. Росновский, В. Н. Карасев, В. С. Росновский 291

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ 298

CONTENTS

METHODS, MODELS AND TECHNOLOGIES 228

Assessing the quality of modeling and forecasting in hydrology – reasoning about the method Boris I. Gartsman 228

The processes of river runoff formation in the permafrost zone permafrost under mining activity in river valleys (on the example of gold mining in the Susuman river basin, the Magadan region) Polina A. Nikitina, Andrey N. Shikhov, Olga M. Makarieva, Anastasiia A. Zemlianskova, Nataliia V. Nesterova 244

About the approximation of the dependence of soil shear resistance on normal pressure Alexey Yu. Vinogradov, Viktor A. Obyazov 256

ECOLOGICAL PROBLEMS AND HAZARDS IN THE HYDROSPHERE 264

Invasions of thermophilic aquatic vegetation as a threat of an emergency situation at nuclear power facilities Viktor N. Beznosov, Antonina L. Suzdaleva 264

Ecological and economic risks of water use under conditions of climate transformation and water regime Vera A. Dmitrieva, Silas Hatungimana 278

Hydrosphere monitoring in the area of Novovoronezh NPP location in order to assess consequences of radionuclide migration from the LRWS-2 (in 1985) Dmitry A. Sharov, Alexey S. Korotkov, Igor V. Pyrkov, Vladimir P. Povarov, Alexey P. Shchukin, Sergey V. Rosnovsky, Viacheslav N. Karasev, Viktor S. Rosnovsky 291

AUTHORS GUIDELINE 298

МЕТОДЫ, МОДЕЛИ И ТЕХНОЛОГИИ
METHODS, MODELS AND TECHNOLOGIES

УДК 556.06 DOI: 10.34753/HS.2023.5.3.228

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ В ГИДРОЛОГИИ – РАССУЖДЕНИЕ О МЕТОДЕ

Б.И. Гарцман

Институт водных проблем РАН, г.Москва, Россия

gartsman@inbox.ru

Аннотация. Существующие в настоящее время гидрологические модели обеспечены лишь крайней ограниченными методическими средствами их калибровки, верификации и тестирования. Крайне актуальной представляется разработка на единой методической основе системы оценок качества при решении ряда типовых задач гидрологии – параметризации и верификации гидрологических моделей, имитационного и сценарного моделирования гидрологического режима, прогнозирования, инженерных расчетов. Без развития системы оценок качества дальнейшее развитие и эффективное практическое использование гидрологических моделей невозможны.

В работе показана логика и, отчасти, история развития некоторых важнейших идей и подходов, применяемых в оценивании качества моделирования и прогнозирования, представлены направления их развития. Выполнена необходимая систематизация терминов рассматриваемой предметной области, начиная с базовых понятий «предсказание» и «прогноз», с рассмотрением дополнительных дефиниций: «непрерывные – агрегированные» прогнозы; «краткосрочные – долгосрочные» прогнозы; «методический», «стандартный», «идеальный», «инерционный», «режимный» прогнозы; и др.

Рассмотрены этапы развития подхода «оценки умений» (skill scores) в разработке мер

ASSESSING THE QUALITY OF MODELING AND FORECASTING IN HYDROLOGY – REASONING ABOUT THE METHOD

Boris I. Gartsman

Institute of Water Problems RAS, Moscow, Russia

gartsman@inbox.ru

Abstract. The currently existing hydrological models are provided with extremely limited methodological tools for their calibration, verification, and testing. It seems extremely relevant to develop, on a unified methodological basis, a system of quality assessment for a number of typical hydrological tasks – parameterization and verification of hydrological models, simulation and scenario modeling of the hydrological regime, forecasting, engineering calculations, etc. Without solving this problem, further development and effective practical use of hydrological models are impossible.

The paper demonstrates the logic and, to some extent, the history of the development of some of the most important ideas and approaches used in assessing the quality of modeling and forecasting, as well as to outline some prospects for their development. The necessary systematization of the terms of the subject area under consideration has been carried out, starting with the basic concepts of “prediction” and “forecast”, with consideration of additional definitions: “continuous – aggregated” forecasts; “short-term – long-term” forecasts; “methodological”, “standard”, “ideal”, “inertial”, “regime” forecasts; and etc.

The stages of development of the “skill scores” approach in the development of measures for assessing the quality of hydrological modeling and forecasting are considered, mainly using the example of the emergence and modification of a

Gartsman B.I. Assessing the quality of modeling and forecasting in hydrology – reasoning about the method. *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2023, vol. 5, iss. 3, pp. 228–243. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2023.5.3.228.

оценки качества гидрологического моделирования и прогнозирования, в основном на примере появления и модификации базовой для гидрологии меры – коэффициента эффективности Нэша-Сатклиффа. Особое внимание уделено двум разложениям меры NSE, показывающим её сводимость к базовым статистическим параметрам выборок измеренных и прогнозных значений переменной: средним значениям, среднеквадратическим отклонениям и коэффициенту корреляции. Предложено обоснование модификации оценки NSE путем применения её к предварительно ранжированным выборкам значений переменной. Сформулирован подход к оцениванию качества моделирования и прогнозирования на основе последовательно статистического подхода, с использованием статистических критериев сходства маргинальных распределений фактических и прогностических значений переменной. Намечен ряд задач перспективных исследований в области развития методов оценки качества гидрологических моделей и прогнозов.

Ключевые слова: модели стока; гидрологические прогнозы; оценка качества прогнозирования; коэффициент эффективности Нэша-Сатклиффа.

basic measure for hydrology - the Nash-Sutcliffe efficiency coefficient. Special attention is paid to two decompositions of the NSE measure, demonstrating its reducibility to the basic statistical parameters of the samples of measured and predicted values of the variable – average values, standard deviations and correlation coefficient. A rationale for modifying the NSE estimate by applying it to pre-ranked samples of variable values is proposed. An approach to assessing the quality of modeling and forecasting is formulated based on a consistently statistical approach, using statistical criteria for the similarity of marginal distributions of actual and forecast values of a variable. A number of tasks for future research are outlined in the field of developing methods for assessing the quality of hydrological models and forecasts.

Keywords: runoff models; hydrological forecasts; forecast quality assessment; Nash-Sutcliffe efficiency coefficient.

Введение

Рассуждение о методе, чтобы хорошо направлять свой разум и отыскивать истину в науках.
Рене Декарт (Сер. «Классики науки». Изд-во АН СССР, 1953)

В настоящее время существует ярко выраженный диссонанс между многочисленностью, разнообразием и детальностью гидрологических и гидравлических моделей, и крайней ограниченностью методических средств их верификации и тестирования [Beven, 2001]. Ключевой научной проблемой представляется получение на единой методической основе оценок качества решения ряда типовых задач гидрологии – параметризации и верификации гидрологических моделей, имитационного и сценарного моделирования гидрологического режима, прогнозирования, инженерных расчетов и т.п. Недостаток методической проработки в этой части – основной фактор, сдерживающий развитие и практическое использование гидрологических моделей.

Поле для исследований по затронутой проблематике чрезвычайно обширно, один только анализ литературных источников по ней мог бы являться предметом большой обзорной

статьи (см. напр. [Аполлов, Калинин, Комаров, 1974; Борщ, Христофоров, 2015; Борщ, Симонов, Христофоров, 2020; Борщ, Симонов, Христофоров, 2023; Рождественский, Чеботарев, 1974; Руководство… , 1994; Руководство… , 1989; Технический регламент… , 2006; Bogner, Pappenberger, 2011; Jolliffe, Stephenson, 2012; Wilks, 1995]). Данной статья, написанная в необычном жанре рассуждения, отражает личные взгляды автора на проблему и основана на многолетнем опыте работы в области гидрологического моделирования и прогнозирования, включающем и знакомство с профильной литературой, небольшая часть которой перечислена выше. Целью является проследить логику и, отчасти, историю развития некоторых важнейших идей и подходов, применяемых в оценивании качества моделирования и прогнозирования, а также наметить некоторые перспективы их развития.

Определим ряд необходимых терминов.

Предсказание (***prediction***) – оценка некоторых характеристик гидрологических процессов или явлений в условиях ограниченности имеющихся данных. Причинами ограниченности данных могут быть направленность предсказания в будущее, когда данные еще не появились, в далекое прошлое, когда данные еще отсутствуют в принципе, либо недостаточность данных существующей сети наблюдений. Предсказание, обращенное в определенное будущее, называется **прогнозом** (**forecasting**). Отличие прогноза от предсказания заключается в точной привязке прогнозируемых величин во времени.

Характерным свойством прогноза, в силу его направленности в обозримый интервал будущего, является ожидаемое появление рядов данных инструментальных наблюдений, которые позволят выполнить независимую, корректную и полную оценку качества прогноза. При других видах предсказаний новые данные для оценки их качества либо не ожидаются вообще, либо они заведомо не будут удовлетворять критериям независимости, корректности и полноты оценки.

Инструментом предсказания всегда является моделирование. Обычно понятие модели используется для обозначения формализованного математического алгоритма, имеющего теоретическое концептуальное обоснование, но модели могут быть также эмпирическими, экспертными, вербальными и т.д. На практике, конкретное предсказание или прогноз всегда опирается на рациональное сочетание формализованного и экспертного знания, при использовании конкретных эмпирических данных.

Применяемый при всех видах предсказания методический инструментарий в принципе единообразен, в том числе обязательно подразумевают наличие оценок качества предсказаний – точности, надежности, оправдываемости и т.п. Такие типовые задачи гидрологии, как параметризация и верификация (калибровка) математических моделей, имитационное и сценарное моделирование гидрологического режима, прогнозирование различного типа и заблаговременности, инженерные расчеты и т.п., концептуально и методически тесно связаны, что предполагает применение таких же взаимоувязанных оценок качества для решения всех подобных задач.

В дальнейшем по отношению к значениям гидрологических переменных термины «расчетные», «модельные», «предсказанные», «прогнозные» будут употребляться как синонимы – в оппозиции к «фактическим», «измеренным» и «наблюденным» значениям. Это делается с полным пониманием того, что термины внутри упомянутых двух групп имеют существенные смысловые различия, и вполне синонимами их можно считать именно в рамках указанного противопоставления, которое является сутью всех оценок качества предсказания.

Гидрологический прогноз – предсказание с различной заблаговременностью и степенью точности элемента гидрологического режима или явления, основанное на знании закономерностей развития гидрометеорологических процессов, определяющих это явление в конкретных условиях данной реки, озера или водохранилища. Гидрологические прогнозы имеют основные характеристики:

– форма представления прогноза (единственное значение, диапазон значений, распределение значений во времени или по вероятности).

– переменная прогноза, выражающая предсказываемый гидрологический элемент;

– заблаговременность прогноза, либо период прогноза или предупреждения;

– оценка качества прогноза;

– целевое назначение прогноза;

С точки зрения цели и формы выдачи существует несколько видов прогнозов, отличающихся характером оценивания их качества.

Непрерывный (количественный) прогноз – прогноз последовательности значений непрерывной гидрологической переменной с временным интервалом, равным или близким к интервалу измерений (почасовой, посуточный, пентадный).

Агрегированный (количественный) прогноз – прогноз агрегированных значений непрерывной гидрологической переменной для временных интервалов, значительно больших, чем интервал измерений (суммарные/средние/максимальные значения, а также кривые продолжительности расходов и т.п., за декаду, месяц, сезон, год).

Прогноз событий (качественный) – прогноз наличия/отсутствия некоторого события, как правило экстремального или опасного: превышения критического уровня воды, прохождения быстроразвивающегося паводка, селя, лавины. Поскольку прогнозируется наступление события или его отсутствие (бинарный выбор), такие прогнозы также называются **бинарными**. Поскольку такие события обычно бывают редкими, употребляется также термин **прогноз редких событий**. Промежуточной формой можно считать **прогноз по категориям**, когда оценивается попадание значения непрерывной или агрегированной переменной в заданный интервал – в этом случае выбор осуществляется, обычно, из нескольких альтернатив.

Вероятностный прогноз – прогноз любого из перечисленных выше типов, выдаваемый не в форме единичного значения, а в форме ожидаемого распределения вероятностей величины. Таким образом, например, агрегированный прогноз может быть в то же время и вероятностным.

Аналогично прогнозам, такие формы предсказания, как имитационное моделирование и сценарные расчеты, также могут подразделяются на непрерывные, аггрегированные, событийные (категориальные) – с аналогичными особенностями процедур оценки их качества. В отношении специфики оценивания качества прогнозирования, преимущественно для непрерывных прогнозов, целесообразно выделять две категории – краткосрочных и долгосрочных прогнозов.

Краткосрочный прогноз – прогноз будущего значения гидрологической переменной на период, сопоставимый с характерным временем реакции исследуемой системы. В таком случае прогноз сильно зависит от состояния системы на момент выпуска прогноза, и основан в большей степени на учете инерции внутренних процессов в системе («память процесса»). Ниже будет показано, что в этом случае обычно прогнозируется тенденция изменения переменной.

Долгосрочный прогноз – прогноз будущего значения гидрологической переменной на период, существенно превышающий характерное время реакции системы. Долгосрочный прогноз опирается не на «память процесса», а на инерцию или закономерности внешних воздействий, и прогнозируется при этом само значение переменной.

Оценка качества прогнозов (предсказаний) – установление количественных характеристик связи между соответствующими выборками значений прогнозов и фактических наблюдений, рассматриваемых как случайные величины, и соотнесение их с заранее установленными градациями качества такой связи. Подчеркнем, что мы будем рассматривать именно количественные параметры, полученных на основе статистического анализа однородных прогнозных данных и данных инструментальных наблюдений стандартного качества, доступных в объеме, позволяющем выполнить корректную, полную и, по возможности, независимую оценку качества прогноза.

Кроме собственно прогнозов, оценки качества в строгом смысле возможны при решении различных задач имитационного моделирования, а также при калибровке

моделей – в этом случае предметом предсказания являются параметры модели. При таких видах предсказания, как сценарные расчеты, палеореконструкции или реконструкции событий по следам, верификация неизбежно может опирается лишь на данные неполные, неоднородные, косвенные, и т.п. Анализ качества при этом всегда содержит элемент экспертного оценивания, не гарантирующие в этом случае корректности и полноты анализа.

Метод (методика) прогноза – совокупность информационных, расчетных, оценочных и других алгоритмов, специально разработанная для получения прогностической информации об интересующей переменной с максимальной точностью и заблаговременностью. Методика прогноза всегда представляет собой реализацию некоторой модели предсказываемых процессов, даже если она (модель) не сформулирована в строгой математической форме.

Методический прогноз – прогноз, выполняемый по некоторой методике. Термин употребляется преимущественно при оценках качества прогнозов в оппозиции к **стандартному прогнозу**. Под стандартным прогнозом подразумевается предсказание будущего значения переменной, получаемое в результате прямого анализа имеющихся фактических данных без специальной методики, либо с применением некоторой «наихудшей» (наименее информативной) методики прогноза. В качестве стандартного прогноза чаще всего выбирается инерционный (для краткосрочных прогнозов) или режимный (для долгосрочных прогнозов), но в каждом конкретном случае возможны варианты, которые следует обосновать специальным анализом. Общим принципом оценки качества методического прогноза является сопоставление некоторой меры его качества с аналогичными мерами, вычисленными для стандартного (наихудшего) прогноза и для идеального прогноза. Такой подход определяется термином skill scores, что на русский язык переводится как «оценка навыков» или «умений».

Идеальный прогноз – условный вариант абсолютно точного прогнозирования фактических значений. В англоязычной литературе термин часто используется в форме perfect forecast, то есть, дословно «совершенный прогноз». Являясь недостижимой абстракцией, такой прогноз используется при оценках качества прогнозирования в виде ряда измеренных данных.

Инерционный прогноз – условный вариант прогнозирования, когда текущее значение величины предполагается неизменным на будущее в течение периода заблаговременности. Возможны варианты инерционного прогноза, например, предполагающие неизменность наблюдаемого изменения величины в будущем на период заблаговременности. Используется в качестве стандартного («наихудшего») прогноза при оценивании для сравнения с методическим прогнозом.

Режимный прогноз – условный вариант прогнозирования, когда значение переменной на прогнозируемый период предполагается равным его средней многолетней величине (норме) на тот же период в течение года. Возможны варианты режимного прогноза, например, учитывающие многолетние тренды в рядах значений гидрологических величин или явлений. Также как инерционный прогноз, используется в качестве стандартного («наихудшего») варианта при оценивании для сравнения с методическим прогнозом.

Меры качества предсказания в рамках подхода «оценки умений»

Мера Нэша-Сатклиффа

Базовая мера оценки качества предсказания в гидрологии называется Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) – коэффициент эффективности Нэша-Сатклиффа [Nash, Sutcliffe, 1970]. Эта простая по форме мера приобрела исключительное значение, являясь основным и практически обязательным (а часто единственным) инструментом верификации гидрологических моделей, что отражено в десятках тысяч научных публикаций и неустановимом числе научно-технических отчетов. Первичная формулировка NSE в авторских обозначениях, с некоторым упрощением, выглядит следующим образом:

$$R^2 = \frac{F_o^2 - F_s^2}{F_o^2}, \quad \text{причем}$$

$$F_s^2 = \sum(q_s - q_o)^2 \text{ и } F_o^2 = \sum(q_o - q_a)^2. \quad (1)$$

Здесь оценка *NSE* обозначена как R^2, исследуемая переменная обозначается как q, q_s – рассчитанные по модели значения переменной, q_o – фактические (измеренные) значения переменной, q_a – среднее из фактических значений переменной. F_s^2, как сумма отклонений рассчитанных значений от фактических по выборке, представляет собой остаточную вариацию (residual variance) модели, а F_o^2 обозначает исходную, либо полную, вариацию (initial variance) моделируемой переменной, в предложенной формулировке равную её дисперсии. Разность этих двух величин представляет собой объясненную моделью вариацию переменной, а оценка качества R^2 равна отношению объясненной вариации к полной (доля объясненной вариации). Такая логика имеет полную аналогию применяемой в регерессионном анализе.

В более детальной и привычной записи, применимой для стандартной задачи имитационного моделирования гидрографа стока, оценка NSE выглядит следующим образом

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(Qs_i - Qo_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(Qo_i - Qa)^2}. \qquad (2)$$

Здесь Qs_i и Qo_i – расчетный (предсказанный) и фактический (измеренный) расходы воды на i-тый момент времени, Qa – среднее значение фактических расходов по выборке, n – объем выборки.

Следует отметить, что с самого начала NSE формулировалась в рамках идеологии «оценки умений». В формуле (2) «оценка умений» модели основана на сопоставлении среднеквадратических погрешностей методического и стандартного прогнозов (предсказаний).

Ясно, что при этом адекватность оценки критически зависит от выбора стандартного прогноза. Если стандартным прогнозом, как в формуле (2), является среднее значение переменной, то его среднеквадратическая погрешность равна дисперсии переменной. Это самый простой, но и самый слабый вариант выбора стандарта для сравнения, приводящий к огрублению оценки и часто – к неоправданному завышению качества прогноза. Очевидно, что получить предсказание расхода, существенно лучшее, чем его средняя величина, можно на основе даже самых простых моделей. Разумной альтернативой выглядит использование в качестве стандартного прогноза режимных данных о стоке, это приводит к оценке NSE в форме

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(Qs_i - Qo_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(Qo_i - Qa_i)^2}\ , \qquad (3)$$

где Qa_i означает уже среднемноголетнее значение расхода на i-й день в году. Для рек с устойчивым режимом такая оценка качества предсказания будет значительно более жесткой, учитывающей воспроизведение не столько общего годового хода стока, сколько особенностей и нарушений такого хода. Это, по сути, означает, что для рек с устойчивым режимом сами режимные данные могут быть использованы в качестве довольно эффективного предсказания. Аналогичный подход широко используется в метеорологии, так как высокая устойчивость годового цикла погоды делает целесообразным любую обработку метеорологических данных, в том числе оценки качества прогнозов, выполнять «в аномалиях», т.е. в значениях отклонения от «климата».

На рисунке 1 схематически представлены оценки для вариантов NSE, выраженных формулами 2 и 3, при предсказании гидрографа одного года. В первом случае NSE= 0,90, т.е. доля объясненной моделью дисперсии процесса по отношению к его среднему значению 90 %. Во втором случае NSE= 0,33, т.е. доля объясненной той же самой моделью дисперсии процесса относительно его режима – 33 %. Для рек с неустойчивым (паводковым) режимом использование режимных данных в качестве стандартного прогноза не дает такого эффекта, а в отдельных, особо сложных, случаях может даже дополнительно огрублять оценку NSE.

Меры оценки качества прогнозов, используемые в России

Вопросы оценки качества прогнозов детально рассмотрены в базовом пособии Росгидромета [Наставление…, 1962]. В качестве основной используется мера качества, называемая на профессиональном жаргоне «эс-к-сигма» (S/σ) – отношение среднеквадратической

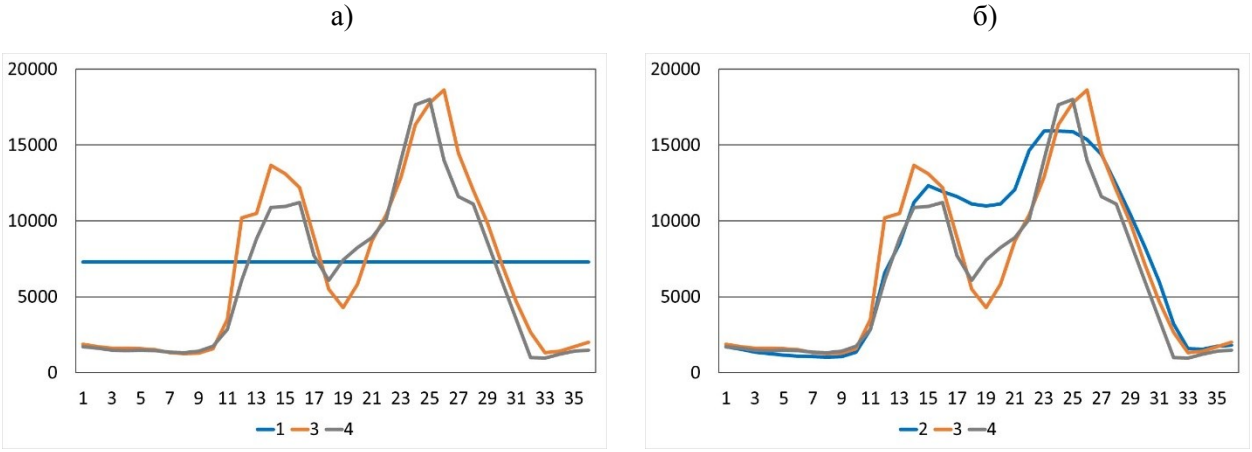


Рисунок 1. Условные примеры вычисления NSE при разных вариантах принятого стандартного прогноза: а) среднее значение за период, R^2=0,90; б) режимные данные – среднемноголетние величины на каждые сутки, R^2=0,33: 1 – среднее, 2 – режим, 3 – прогноз, 4 – факт

Figure 1. Conditional examples of calculating NSE for different versions of the accepted standard forecast: a) average value for the period, R^2 = 0.90; b) regime data – long-term average values for every day, R^2=0.33: 1 – mean, 2 – regime, 3 – forecast, 4 – fact

ошибки прогноза S к среднеквадратическому отклонению прогнозируемой переменной $\boldsymbol{\sigma}$. При этом, в обозначениях упомянутого пособия,

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_i^p - Q_i)^2}{n-m}} \quad (4)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_i - \overline{Q})^2}{n-1}}. \quad (5)$$

Здесь $Q^p{}_i$ и Q_i – прогнозный и фактический расходы на i-тый момент времени, $\overline{Q}$ – среднее значение фактических расходов по выборке, n – объем выборки.

Вычитание из n в знаменателе этих выражений числа парамеров прогностической модели m и единицы представляет собой введение поправок в оценки, учитывающие ограниченный объем выборок, причем только для случая проверки методики прогноза на зависимом материале, который использовался при оценке параметров модели. В любом случае, при больших выборках этими поправками можно пренебречь. Легко увидеть, что отношение S/σ представляет собой точный эквивалент дробного члена выражения для R^2 (формула 2), отличаясь лишь извлечением корня. Для оценки качества прогнозов используется также корреляционное отношение

$$\rho = \sqrt{1 - \frac{S^2}{\sigma^2}}, \quad (6)$$

которое равно, и означает то же самое, что и R (не в квадрате).

Не употребляя термин «skill scores», разработчики российской методики придерживались и активно развивали сам этот подход. Так, при краткосрочном прогнозе оценивается прогнозирование не абсолютной величины расхода, а его изменения по сравнению с текущим состоянием. При этом среднеквадратическое отклонение изменения прогнозируемой переменной обозначается как σ_Δ и вычисляется по формуле

$$\sigma_\Delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(\Delta Q_i - \overline{\Delta Q})^2}{n-1}}. \quad (7)$$

Здесь ΔQ_i и $\overline{\Delta Q}$ – изменения прогнозируемой переменной за период заблаговременности прогноза, на i-тый момент времени и их средняя величина, соответственно.

Эта мера отвечает случаю принятия в качестве стандарта инерционного прогноза – расход на будущий момент принимается равным его значению на момент выпуска прогноза. В упомянутом Наставлении даются и более детальные рекомендации по модификации меры качества S/σ в зависимости от особенностей прогнозируемой величины – подъема уровней от различных причин, объемов стока, сроков наступления определенных событий и других.

Таким образом, в изданном в 1962 г. базовом российском нормативном документе установлена развитая система оценок качества прогнозов различных гидрологических параметров, по концепции и основным математическим формулировкам полностью совпадающая с оценкой NSE и рядом ее модификаций, предложенных в 1970–80-е и последующие годы. По-видимому, российская гидрология имеет твердый приоритет в разработке методов такого оценивания, международному признанию которого помешали лишь определенные исторические обстоятельства.

Анализ Аллана Мерфи

Глубокая и систематическая разработка темы мер оценки качества моделирования и прогнозирования выполнялась в близкой гидрологии дисциплине, где физико-математические модели стали основным инструментом работы гораздо раньше, а значение прогнозов разного рода, как основной продукции, гораздо выше, – в синоптической метеорологии. Ярким примером этого являются публикации Аллана Мерфи, где формулируются принципы, раскрываются смысл и взаимосвязи подобных мер [Murphy, Winkler, 1987; Murphy 1988]. Изложим кратко некоторые его результаты, прямо относящиеся к теме нашего анализа. Прежде всего, выдвигается базовый принцип – вся информация о качестве и эффективности прогнозов заключена в двумерном совместном распределении вероятностей прогностических и фактических значений переменной, на основе которого строятся любые соответствующие оценки и анализ.

Далее, Мерфи тщательно формулирует сам подход «оценки умений» (skill scores) прогнозной модели, основанной на отношении меры расхождений фактических значений переменной и прогностических (по анализируемой методике) к аналогичной мере расхождений фактических и оценочных значений переменной, получаемых гарантированно по некоторой базовой процедуре, которая нами выше названа стандартным прогнозом. Таким образом, мера skill scores прогностической методики заключается в оценке её места в диапазоне между идеальным (perfect) прогнозом, значения которого точно совпадают с фактическими, и «наихудшим» (standard of reference), выбор которого обуславливает ширину диапазона и чувствительность оценки.

В математической записи, по Мерфи, это выражается следующим образом

$$S=(A_f - A_r)/(A_p - A_r), \quad (8)$$

где S – мера «оценки умений», A_f, A_p и A_r – меры точности методического, идеального и стандартного прогнозов, соответственно. Важно подчеркнуть, что в данной формуле для оценки умений могут быть использованы самые различные формы меры A, важно лишь чтобы при каждом оценивании во всех трех случаях это была бы одна и та же форма. Если, следуя традиции, использовать меру среднеквадратического отклонения (*MSE*) в обозначениях Мерфи

$$MSE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(f_i - x_i)^2, \quad (9)$$

то после подстановки уравнения (9) в уравнение (8) получим тот же коэффициент эффективности Нэша-Сатклиффа (NSE). Здесь прогностические и фактические значения переменной обозначены как f и x, соответственно, i и n описаны выше. Использование любой другой меры вместо MSE приведет к иной форме конечной оценки качества прогнозирования.

Вторым важным моментом анализа Мерфи является выделение четырех основных вариантов стандартного прогноза, существенно влияющих как на величину, так и на смысл получаемой оценки.

1. Среднее из фактических значений переменных (x_a), рассчитанное для всего интервала, на котором выполняется моделирование либо испытания прогнозов (internal). Именно в этом случае получаем оценку, точно совпадающую с классической формой NSE.

2. Выборка средних из фактических значений на каждую календарную дату ($x_{a,i}$), рассчитанных в пределах интервала, на котором выполняется моделирование либо испытания прогнозов (internal).

3. Среднее из фактических значений переменных, рассчитанное для многолетнего интервала, значительно превышающего тот, на котором выполняется моделирование либо испытания прогнозов (external).

4. Выборка средних из фактических значений на каждую календарную дату, рассчитанных в пределах многолетнего интервала, значительно превышающего тот, на котором выполняется моделирование либо испытания прогнозов (external).

Все варианты строятся на обобщении климатологических (в нашем случае – режимных гидрологических) данных.

Все эти варианты оценок хорошо известны специалистам, занимающимся разработкой прогностических моделей или имитационным, например, сценарным, моделированием. Первый вариант дает наиболее оптимистичную (высокую) оценку качества прогнозирования, а далее по последовательности оценки становятся более жесткими. Варианты 1 и 2 стандартного прогноза (internal) более употребительны для краткосрочного прогнозирования, для долгосрочного применяются обычно стандартная оценка по многолетнему ряду. Применение режимных данных по календарным датам ($x_{a,i}$) оправдано, как упоминалось выше, лишь в случае высокой устойчивости гидрологического режима. В целом, выбор оптимальной процедуры оценки качества прогноза представляет собой нетривиальную задачу, обусловленную как свойствами прогнозируемых величин, так и порядком, и целью прогнозирования.

Третий важный момент – предложенное Мерфи разложение оценки NSE на составляющие, наглядно представляющее смысл этого показателя. Ограничиваясь только первым из перечисленных выше 4 вариантов и придерживаясь обозначений Мерфи с минимальными коррективами, полученный им результат выглядит следующим образом

$$SS(f,\bar{x},x) = r_{fx}^2 - \left(r_{fx} - \frac{\sigma_f}{\sigma_x}\right) - \left(\frac{\bar{f}-\bar{x}}{\sigma_x}\right)^2. \quad (10)$$

Здесь $\bar{f}$ и $\bar{x}$ – средние на интервале поверки прогноза значения прогнозных и фактических величин, σ_f и σ_x –величины их среднеквадратических отклонений, r_{fx} коэффициент парной линейной корреляции между ними, $SS(f,\bar{x},x)$ обозначает «оценку умений» *S*, полученную с использованием MSE в соответствии с вариантом 1 – с принятием $\bar{x}$ в качестве стандартного прогноза. Таким образом, $SS(f,\bar{x},x)$ обозначает ту же оценку, которую выше мы обозначали как R^2.

Видим, что оценка NSE складывается из трех членов, первый из которых – квадрат коэффициента корреляции, отражающий тесноту связи прогнозных и фактических значений. Второй член содержит разность коэффициента корреляции, характеризующего наклон связи {f, x}, и отношение среднеквадратических отклонений прогнозных и фактических значений, соответствующее наклону той же связи при условии её однозначности, т.е. при r=1. Этот член стремится к нулю при приближении связи {f, x} к линейной однозначной, т.е. характеризует условную (зависящую от его величины) систематическую ошибку прогноза. Третий член уравнения (10) характеризует абсолютную систематическую ошибку прогноза.

Таким образом, парный коэффициент корреляции (его квадрат) составляет суть и положительную часть оценки NSE, которая не может его превысить. Это дает основание рассматривать его как потенциальную (предельно возможную) меру «оценки умений». Два других члена связаны с систематическими погрешностями прогноза и могут только ухудшить итоговую оценку по сравнению с потенциальной. При разложении оценки *SS* для трех остальных вариантов из выше перечисленных, Мэрфи получает более сложные выражения с добавочными членами, рассмотрение которых выходит за рамки нашего анализа.

Анализ Гупты с соавторами

Дальнейшее развитие анализа показателя NSE излагается в основном, следуя этапной работе Хошина Гупты с тремя соавторами [Gupta et al., 2009]. В указанной работе авторы предлагают свое разложение той же простейшей формы NSE, альтернативное разложению Мерфи (уравнение 10). В авторских обозначениях оно выглядит как

$$NSE = 2 \cdot \alpha \cdot r - \alpha^2 - \beta_n^2,$$
где $\alpha=\sigma_s/\sigma_o$, $\beta_n=(\mu_s-\mu_o)/\sigma_o$. (11)

Здесь μ_s и μ_o – средние значения моделированных и наблюденных значений переменной; σ_s и σ_o – их же среднеквадратические

отклонения; остальные обозначения определены выше.

В приведенном разложении также имеются три члена, первый из которых содержит коэффициент корреляции, то есть отвечает за совпадение формы прогнозного и фактического гидрографов. Второй член содержит отношение дисперсий прогнозных и фактических величин, а третий – разность их средних значений, нормированную на дисперсию фактических значений переменной и точно соответствует третьему члену разложения Мерфи.

В этой связи отмечается два существенных недостатка оценки NSE при использовании в калибровке моделей. Первый – то, что β_n содержит разность средних значений модельных и измеренных величин, нормированную на дисперсию измеренных. Согласно [Gupta et al., 2009], это может приводить к недооценке систематической ошибки прогноза при калибровке. По нашему мнению, это неосновательно, т.к. все члены уравнения (11) одинаково нормированы на дисперсию, и это естественно при использовании квадратичных мер расхождения. Важно также, что β_n входит в состав оценки NSE, минимизирующей сумму квадратов расхождений модельных и фактических значений, то есть систематическая ошибка среднего учитывается оптимальным образом для достижения этого результата.

Второй, действительно существенный, недостаток применения NSE в качестве меры расхождения при калибровке модели заключается в систематическом занижении дисперсии серии модельных значений переменной. Это становится очевидным, если взять в уравнении (11) первую производную от NSE по α – она имеет максимум при α=r, а поскольку при реальном моделировании всегда r<1, то по результатам калибровки всегда будет $\sigma_s < \sigma_o$. Эффект занижения дисперсии моделированных серий хорошо знаком специалистам, работающих с разными гидрологическими моделями, но его причина, которая заключается не в свойствах моделей, а в применяемой при калибровке мере расхождения, неочевидна. Таким образом, из уравнения (11) понятно, что максимального значения, равного r^2, NSE достигает при условиях $\alpha=r$, $\beta_n=0$ и $\sigma_s \cong \sigma_o$ будет лишь при $r \cong 1$, т.е. при приближении к идеальному прогнозу.

Для преодоления этого недостатка авторы [Gupta et al., 2009] предлагают два подхода. Возможно при калибровке модели вводить поправки к фактическим значениям переменной, которые приводили бы к получению максимума NSE при $\sigma^*_s \cong \sigma_o$, в форме

$$x^*_{o,t} = c\left(x_{o,t} - \mu_o\right) + \mu_o, \qquad (12)$$

$$\mathrm{NSE} = \frac{1}{c} \cdot 2 \cdot \alpha \cdot r - \frac{1}{c^2} \cdot \alpha^2 - \frac{1}{c^2} \cdot \beta_n^2. \qquad (13)$$

Здесь c – поправка, причем из выражения (13) ясно, что при c=1/r максимум NSE достигается при α=1. Фактически, поправка с выступает как еще один параметр при калибровке.

Второй подход основан на использовании вместо NSE искусственно сконструированной меры KGE (Kling–Gupta efficiency). KGE, также как и NSE, включает три члена, представляющих раздельно коэффициент корреляции модельных и измеренных значений переменной, соотношения их среднеквадратических отклонений и средних величин, и также стремится к 1 при идеальном прогнозе:

$$\mathrm{KGE} = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + (\alpha-1)^2 + (\beta-1)^2},$$

где $\beta = \mu_s/\mu_o$. (14)

Оба подхода отличаются некоторой искусственностью, ставящей под сомнение оптимальность предлагаемых мер расхождения. Следует еще раз подчеркнуть, что форма оценки NSE, при использовании её в калибровке моделей, обеспечивает минимизацию суммы квадратов разностей синхронных модельных и измеренных значений, и все члены, на которые эта форма может быть разложена, находятся в оптимальном соотношении с точки зрения достижения этой цели. То есть, любые иные формы, в частности предлагаемые Гуптой с соавторами, данную задачу не решают. Фактически, эти предложения вводят инновационную, по сравнению с подходом Мерфи, идею – ослабить требование максимальной близости синхронных прогнозных и фактических значений в пользу большей близости параметров соответствующих распределений вероятности.

Возможности альтернативных мер качества предсказания

Для развития упомянутой инновации зафиксируем еще раз обсуждаемые выше исходные концептуальные положения. Вся информация о качестве и эффективности прогнозов заключена в двумерном совместном распределении вероятностей прогностических и фактических значений переменной, на основе которого строятся любые соответствующие оценки и анализ. Хороший прогноз характеризуется двумерным распределением с близкими маргинальными распределениями (при идеальном прогнозе они совпадают) прогностических и фактических значений, и сильной корреляцией между ними (в идеале – прямая однозначная связь). В качестве базовой меры расхождения, на основе похода «оценки умений», предложена форма, направленная на минимизацию суммы квадратов разностей синхронных модельных и измеренных значений, то есть на точное воспроизведение моделью (прогнозом) временной последовательности фактических значений переменной.

В гидрологии суши это формулируется как задача точного воспроизведения моделью измеренного гидрографа стока, для чего базовой формой меры расхождения является NSE, в различных возможных его вариантах. Оба рассмотренных выше разложения показывают, что оценка NSE полностью сводится к комбинации статистических параметров двумерного распределения вероятностей – маргинальных средних и среднеквадратических отклонений, а также коэффициента корреляции. В случае двумерного нормального распределения линейно связанных переменных эти параметры содержат исчерпывающую информацию о полном распределении, но такие условия в гидрологии практически никогда не выполняются. В случае ассиметричных маргинальных распределений и нелинейности связей неполнота информации, заключенной в оценке NSE, обусловлена свойствами конкретного двумерного распределения.

Кроме того, вышеизложенный анализ выявил, что воспроизведение отдельных учитываемых параметров двумерного распределения находится в определенном противоречии. Требование, чтобы прогноз имел высокую корреляцию с фактическими значениями, означает попытку синхронного воспроизведения временной последовательности значений переменной. Однако в любом реальном случае прогнозирования получаем корреляцию, далекую от 1, а это приводит к занижению дисперсии прогноза, что также является его недостатком.

Легко увидеть, что требование (постановка в виде идеальной цели) точного воспроизведения временной последовательности фактических значений переменной возникло исторически на основе потребностей той области, в которой изначально система оценок развивалась – это область синоптической метеорологии и краткосрочных прогнозов погоды. Также естественно это требование было усвоено в краткосрочных гидрологических прогнозах, поскольку именно здесь необходим непрерывный, в нашей терминологии, прогноз гидрографа. Однако, когда речь идет о долгосрочных и сценарных прогнозах, инженерно-гидрологических расчетах, предсказываются агрегированные за большой период (месяц, сезон, год) величины, либо расчетные значения заданной обеспеченности. Требование пошагового воспроизведения гидрографа в таких случаях явно избыточно, в то время как необходимость наиболее правильного воспроизведения свойств распределения вероятности прогнозируемой характеристики выдвигается на первый план.

Есть и другой мотив, делающий целесообразным использование при калибровке моделей мер сходимости типа NSE, требующих точного воспроизведения гидрографа. Можно утверждать, что именно такой результат калибровки дает наибольшую уверенность в точности и надежности моделей, и позволяет в дальнейшем полагаться на них при решении самых разнообразных задач. Однако в этом утверждении содержится важное и неочевидное допущение, требующее специального разбора. Поясним это на примере.

Хорошо известна ситуация при калибровке моделей стока, когда некоторые дождевые паводки на гидрографе стока возникают как бы

ниоткуда, поскольку в записи осадков на соответствующий период времени нет паводкообразующего дождя. Модель в таких случаях воспроизвести паводок не может и допускает грубую ошибку. Менее очевидные, но на самом деле вполне подобные, ситуации связаны с выпадением сильных дождей, от которых на фактическом гидрографе существенного паводка не обнаруживается. Непосредственные причины этого очевидны – редкость наблюдательных сетей и «пятнистость» выпадения сильных дождей приводят к пропускам либо ливней, либо паводков в рядах наблюдений. Если таких случаев много, то это сильно отражается на итоговом значении оценки качества моделирования.

При работе с гидрологической моделью обрабатываются потоки метеорологических событий на входе и гидрологических событий на выходе. Для простоты будем говорить далее о ливнях и паводках. Если система наблюдений такова, что потоки ливней и паводков состоят из генетически связанных событий, и только из них, то эти потоки связаны взаимно-однозначным соответствием и такие данные можно назвать «репрезентативными по потоку событий». Тогда ошибки работы модели связаны либо с ошибками наблюдений, либо со структурой и параметрами моделей, но концепция калибровки модели в этом случае вполне состоятельна. То есть, при такой ситуации, удлинение рядов и повышение качества наблюдений со временем должно дать в результате калибровки надежные устойчивые значения параметров, имеющие определенный физический смысл либо, по крайней мере, рациональную интерпретацию. Обычно такова ситуация для рек с устойчивым режимом и преобладанием снеготаяния в питании стока, поскольку событием в этом случае являются гидрологические сезоны, а представить себе систему наблюдений, способную «пропустить» целую весну или лето, невозможно.

Если взаимно-однозначное соответствие входного и выходного потоков событий существенно нарушается, что характерно для рек с дождевым питанием и паводковым режимом, то именно эти нарушения становятся основным источником погрешностей в работе моделей. Причем в этом случае опровергается сама концепция калибровки – никакое удлинение рядов и повышение качества наблюдений не приведет в этом случае к получению откалиброванных устойчивых и надежных, физически осмысленных параметров. То есть, в ситуации наблюдений с явной «нерепрезентативностью по потоку событий» ставить задачу точного воспроизведения гидрографа избыточно и некорректно.

Однако, гидрометрический створ и метеостанция, взаимно нерепрезентативные по потоку событий, могут быть по отдельности вполне репрезентативны по отношению к региональному гидрологическому режиму и климату. В таком случае стоковая модель будет способна, с использованием этих метеоданных, воспроизводить агрегированные и режимные характеристики стока, которые в процессе калибровки могут сопоставляться с данными этого гидропоста. Изложенные рассуждения приводят нас к целесообразности испытания меры, аналогичной NSE, но применяемой к ранжированным выборкам модельных и измеренных значений. В наиболее простом виде, и в привычных обозначениях это приводит к форме

$$R_r^2 = 1 - \frac{\sum_{r=1}^{n}(Qs_r - Qo_r)^2}{\sum_{r=1}^{n}(Qo_r - Qa)^2}. \quad (15)$$

Здесь все обозначения совпадают с формулой (2) лишь замена *i* на *r* указывает, что в ранжированной выборке перебор членов идет не по времени, а по рангу.

Формула (15) вполне может быть подвергнута разложению аналогично формуле (11):

$$R_r^2 = 2 \cdot \alpha \cdot \rho - \alpha^2 - \beta_n^2, \quad (16)$$

где α и β_n означают то же самое и численно равны таким же параметрам в формуле (11). Единственное существенное различие уравнений (16) и (11) – замена коэффициента парной линейной корреляции r на корреляционное отношение ρ, вычисляемое уже не по синхронным, а по одноранговым значениям переменной. В данном случае ρ является коэффициентом сходства формы кривых эмпирических кривых распределения прогностических и фактических значений,

поскольку именно их мы сравниваем, применяя ранжирование.

В показателе R_r^2 присутствуют два первых момента маргинальных распределений модельных и фактических значений переменной, и отдельная характеристика сходства их формы. Корреляция, в смысле синхронности колебаний двух переменных, этим показателем не оценивается. Формальный показатель ρ, очевидно, будет иметь значения гораздо выше, чем коэффициент линейной корреляции r, поэтому при использовании меры R_r^2 обычные градации качества моделирования, принятые для оценки NSE, нельзя использовать – все границы градаций должны быть определены заново. Представляется, что для данной оценки будет еще более целесообразным использование меры со стандартом не виде среднего значения за период, а осредененных режимных посуточных данных в виде

$$R_r^2 = 1 - \frac{\sum_{r=1}^{n}(Qs_r - Qo_r)^2}{\sum_{r=1}^{n}(Qo_r - Qa_r)^2}, \quad (17)$$

где Qa_r – ранжированные средние за многолетний период расходы на каждую дату. Такая оценка будет намного чувствительнее.

На рисунке 2 представлены условные примеры вычисления NSE по ранжированным выборкам в двух вариантах в соответствии с формулами (15) и (17). Использованы те же исходные данные, что и для рисунка 1. Интуитивно ясно, например, что вариант с принятием среднемноголетнего значения в качестве стандартного прогноза по формуле (15) дает явно завышенную оценку качества прогноза и вряд ли может иметь практическую ценность.

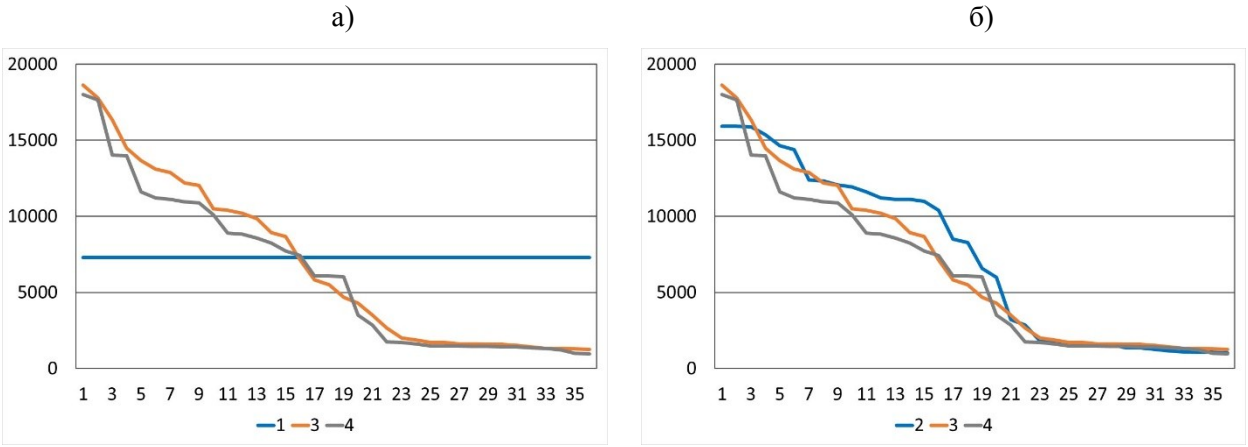


Рисунок 2. Условные примеры вычисления оценки NSE по ранжированным выборкам при разных вариантах принятого стандартного прогноза: а) среднее значение за период, R_r^2=0,97; б) режимные данные – среднемноголетние величины на каждую дату, R_r^2=0,70: 1 – среднее, 2 – режим, 3 – прогноз, 4 – факт

Figure 2. Conditional examples of calculating NSE based on ranked samples for different versions of the accepted standard forecast: a) average value for the period, R_r^2=0.97; b) regime data – long-term average values for each date, R_r^2=0.70: 1 – mean, 2 – regime, 3 – forecast, 4 – fact

Пример имеет чисто иллюстративное значение, какие-либо интерпретации результатов представляются пока преждевременными. Однако, можно обратить внимание, что для обоих вариантов оценки доли необъясненной изменчивости переменной (residual variance) примерно вдвое меньше, чем для аналогичных традиционных мер (см. рисунок 1). Методическая разработка оценок, основанных на таких мерах, должна быть предметом специального исследования.

Отметим, что переход к сравнению только маргинальных распределений моделированных и фактических значений переменной нацеливает на общее изменение подхода к оцениванию на последовательно статистический. Ясно, что при

точном совпадении модельной и измеренной ранжированных выборок показатель R_r^2 тоже достигает значения 1. При этом сравнение выборочных распределений, либо параметров, никогда не строится на требовании их точного совпадения, которое является событием с нулевой вероятностью. Достаточно вывода о принадлежности двух выборок к одной генеральной совокупности, либо принадлежности выборки к заданной генеральной совокупности, что проверяется с помощью статистических критериев.

С учетом структуры выражения (16), кажется целесообразным использование трех хорошо известных критериев: Стьюдента – для сравнения средних значений; Фишера – для сравнения дисперсий; χ^2 – для сравнения кривых распределения. Однако принцип применения критериев при решении такой задачи существенно изменяется. Если обычно критерии применяются для оценки различия между распределениями с высокой надежностью, для чего рассчитывают величины статистик расхождения с низкой вероятностью (0,05, либо 0,01), то в данном случае нам требуется как можно более высокая вероятность совпадения распределений, т.е. следует использовать статистики критериев с вероятностью, вероятно, 0,95 или 0,99. Поскольку три предлагаемых критерия могут дать различные оценки вероятности, то для итоговой оценки необходимо использовать некоторую их комбинацию, в первом приближении – минимальное значение из трех, как наиболее жесткий показатель качества моделирования. Разумеется, использование такого подхода требует разработки нового метода оценивания качества моделирования и прогноза, вероятно даже создания специальных статистических критериев.

Отметим также, что если используемая при моделировании система наблюдений обладает описанным выше свойством «репрезентативности по потоку событий», то достижение высокого качества моделирования в смысле $R_r^2 \cong 1$ будет в то же время означать и достижение высокого значения обычного показателя NSE. Вероятно, это можно доказать строго, но во всяком случае интуитивно ясно, что если на входе и выходе системы будем наблюдать строго генетически связанные потоки событий, то высокое сходство маргинальных законов распределения модельных и фактических данных возможно лишь при высоком качестве воспроизведения гидрографа; иное чрезвычайно маловероятно. Напротив, если «репрезентативности по потоку событий» в данных не наблюдается, то качественное воспроизведение гидрографа невозможно, но хорошее сходство маргинальных распределений – вполне.

Заключение

Подчеркнем еще раз, что современные тщательно разработанные в физико-математическом отношении модели гидрологических процессов требуют адекватной, развитой системы методических средств их верификации и тестирования на единой методологической основе. Такой системы в настоящее время не существует, что является ключевой современной проблемой не только развития, но и прикладного использования гидрологических моделей. К настоящему времени можно указать ряд конкретных проблем, с которыми сталкиваются специалисты-гидрологи при калибровке моделей и поверке прогнозов с применением традиционных статистических подходов и форм оценок.

1. Отсутствуют надежные и общепринятые методы отбраковки сильных выбросов в рядах расчетных и фактических значений переменных вследствие грубых погрешностей, равно неизбежных при моделировании и измерениях.

2. Отсутствуют общепринятые методы оценки качества моделей и прогнозов, способных надежно и точно работать в условиях нестационарного климата и изменений ландшафтов, отражающихся в рядах гидрологических переменных.

3. Отсутствуют общепринятые методы оценки качества многомерного (по группе станций) моделирования или прогноза, учитывающих пространственную структуру потока гидрологических событий в пределах пространственно-распределенных моделей.

4. Для пространственно-распределенных физически обоснованных моделей не существует также комплексных методов их калибровки и

верификации на основе всей имеющейся информации об элементах гидрологического цикла, которые в них воспроизводятся и по которым имеются данные сетевых наблюдений.

5. Недостаточно разработана методическая база оценивания бинарных прогнозов редких событий.

6. Слабо разработаны методы калибровки моделей и верификации прогнозов для случаев, когда результаты выдаются в вероятностной форме.

Перечисленные выше задачи определяют, но не исчерпывают, направления дальнейших исследований по проблематике.

Литература

Аполлов Б.А., Калинин Г.П., Комаров В.Д. Курс гидрологических прогнозов. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 419 с.

Борщ С.В., Христофоров А.В. Оценка качества прогнозов речного стока // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2015. Т. 355. С. 3–195.

Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Эффективность моделирования и прогнозирования речного стока. // Гидрологические исследования и прогнозы. № 1 (375). 2020. С. 176–189.

Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Прогнозирование стока рек России. М.: Изд-во ФГБУ «гидрометцентр России», 2023 г. 200 с.

Наставления по службе прогнозов. Раздел 3. Ч.1. Прогнозы режима вод суши. Л.: Гидрометеоиздат, 1962. 194 с.

Рождественский А.В., Чеботарев А.И. Статистические методы в гидрологии. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 424 с.

Руководство по гидрологической практике ВМО. Сбор и обработка данных, анализ, прогнозирование и другие применения (ВМО №168). Женева: Секретариат ВМО. 1994. 811 с.

Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 2. Краткосрочный прогноз расхода и уровня воды на реках. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 245 р.

Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 1. Долгосрочные прогнозы элементов водного режима рек и водохранилищ. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1989. 357 р.

Технический регламент ВМО. Том III. Гидрология. (ВМО №49). Женева: Секретариат ВМО. 2006. 140 с.

References

Apollov B.A., Kalinin G.P., Komarov V.D. *Kurs gidrologicheskikh prognozov [Course of hydrological forecasts]*. L.: Gidrometeoizdat, 1974. 419 p. (In Russian).

Beven K.J. *Rainfall-runoff Modelling: The Primer.* Chichester: Wiley&Sons, 2001. 488 p.

Bogner K., Pappenberger F. Multiscale error analysis, correction, and predictive uncertainty estimation in a flood forecasting system. *Water Res. Res,* 2011, vol. 47(W07524), p. 24. JRC56973. DOI: 10.1029/2010WR009137.

Borshch S.V., Khristoforov A.V. Otsenka kachestva prognozov rechnogo stoka [Assessing the quality of river flow forecasts]. *Proceedings of the Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation*, 2015, vol. 355, pp. 3–195. (In Russian).

Borshch S.V., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V. *Effektivnost' modelirovaniya i prognozirovaniya rechnogo stoka [Efficiency of river flow modeling and forecasting]*. M.: Hydrological research and forecasts, No. 1 (375), 2020, pp. 176–189. (In Russian).

Borshch S.V., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V. *Prognozirovaniye stoka rek Rossii [Forecasting the flow of Russian rivers]*. M.: Hydrometeorological Center of Russia Publ., 2023. 200 p. (In Russian).

Gupta H. V., Kling H.; Yilmaz K. K., Martinez G. F. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *J. Hydrol.,* 2009, vol. 377, pp. 80–91. DOI:10.1016/j.jhydrol.2009.08.003.

Jolliffe I.T., Stephenson D.B. *Forecast verification. Forecast verification: a practitioner's guide in atmospheric science.* Chichester: Wiley&Sons, 2012. 254 p.

Murphy A.H., Winkler R.L. A General Framework for Forecast Verification. *Monthly Weather Review*,

Beven K.J. Rainfall-runoff Modelling: The Primer. Chichester: Wiley&Sons, 2001. 488 p.

Bogner K., Pappenberger F. Multiscale error analysis, correction, and predictive uncertainty estimation in a flood forecasting system // Water Res. Res. 2011. V. 47 (W07524) P. 24. JRC56973. DOI: 10.1029/2010WR009137.

Gupta H. V., Kling H.; Yilmaz K. K., Martinez G. F. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling // J. Hydrol. 2009. Vol. 377. P. 80–91. DOI:10.1016/j.jhydrol.2009. 08.003.

Jolliffe I.T., Stephenson D.B. Forecast verification // Forecast verification: a practitioner's guide in atmospheric science. Chichester: Wiley&Sons, 2012. 254 p.

Murphy A.H., Winkler R.L. A General Framework for Forecast Verification // Monthly Weather Review. 1987. Vol. 115. P. 1330–1338. DOI:10.1175/1520-493(1987)115<1330:AGFFFV> 2.0.CO;2.

Murphy A. H. Skill Scores Based on the Mean Square Error and Their Relationships to the Correlation Coefficient // Monthly Weather Review. 1988. Vol. 116. P. 2417–2424. DOI:10. 1175/1520-493(1988)1162417:SSBOTM>2.0.CO;2.

Nash J. E.; Sutcliffe J. V. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles // J. Hydrol. 1970. Vol. 10 (3). P. 282–290. DOI:10.1016/0022-1694(70)90255-6.

Wilks D.S. Statistical methods in the atmospheric sciences: an introduction // Int. Geophys. Ser. Academic Press. 1995. Vol. 59. P. 467.

1987, vol. 115, pp. 1330–1338. DOI:10.1175/1520-0493(1987)115<1330:AGFFFV >2.0.CO;2/

Murphy A. H. Skill Scores Based on the Mean Square Error and Their Relationships to the Correlation Coefficient. *Monthly Weather Review*, 1988, vol. 116, pp. 2417–2424. DOI: 10.1175/1520-0493(1988)116<2417:SSBOTM> 2.0. CO;2.

Nash J. E.; Sutcliffe J. V. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *J. Hydrol.,* 1970, vol. 10(3), pp. 282–290. DOI:10.1016/0022-1694(70)90255-6.

Nastavleniya po sluzhbe prognozov. Razdel 3. CH.1. Prognozy rezhima vod sushi. [Instructions for the forecasting service. Section 3. Part 1. Forecasts of land water regime.]. L.: Gidrometeoizdat, 1962. 194 p. (In Russian).

Rozhdestvensky A.V., Chebotarev A.I. *Statisticheskiye metody v gidrologii [Statistical methods in hydrology]*. L.: Gidrometeoizdat, 1974. 424 p. (In Russian).

Rukovodstvo po gidrologicheskoy praktike VMO. Sbor i obrabotka dannykh, analiz, prognozirovaniye i drugiye primeneniya [WMO Guide to Hydrological Practices. Data collection and processing, analysis, forecasting and other applications] (WMO No. 168). Geneva: WMO Secretariat, 1994. 811 p. (In Russian).

Rukovodstvo po gidrologicheskim prognozam. Vyp. 2. Kratkosrochnyy prognoz raskhoda i urovnya vody na rekakh [Guide to Hydrological Forecasts. Vol. 2. Short-term forecast of flow and water level on rivers]. L.: Gidrometeoizdat, 1989. 245 p. (In Russian).

Rukovodstvo po gidrologicheskim prognozam. Vyp. 1. Dolgosrochnyye prognozy elementov vodnogo rezhima rek i vodokhranilishch. [Guide to Hydrological Forecasts. Vol. 1. Long-term forecasts of elements of the water regime of rivers and reservoirs]. L.: Gidrometeoizdat, 1989. 357 p. (In Russian).

Tekhnicheskiy reglament VMO. Tom III. Gidrologiya. [WMO Technical Regulations. Volume III. Hydrology.] (WMO No. 49). Geneva: WMO Secretariat, 2006. 140 p. (In Russian).

Wilks D.S. Statistical methods in the atmospheric sciences: an introduction // *Int. Geophys. Ser. Academic Press*, 1995, vol. 59, p. 467.

УДК 556.044, 556.12 DOI: 10.34753/HS.2023.5.3.244

ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА РЕК КРИОЛИТОЗОНЫ В УСЛОВИЯХ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В РЕЧНЫХ ДОЛИНАХ (НА ПРИМЕРЕ ДОБЫЧИ ЗОЛОТА В БАССЕЙНЕ Р. СУСУМАН, МАГАДАНСКАЯ ОБЛАСТЬ)

П.А. Никитина[1], А.Н. Шихов[2], О.М. Макарьева[3,1], А.А. Землянскова[3,1], Н.В. Нестерова[1,4]

[1]Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия; [2]Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия; [3]Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан, Россия; [4]Государственный гидрологический институт, г. Санкт-Петербург, Россия

nikitinapolina243@gmail.com

Аннотация. Добыча золота на россыпных месторождениях Восточной Сибири и Дальнего Востока играет важную роль в экономике этих регионов. Магаданская область в данной отрасли занимает первое место в России. Однако увеличение объемов добычи сопровождается негативными последствиями для природной среды, включая изменение русел рек, уничтожение растительного покрова, увеличение мутности воды и др. Эти изменения могут стать источником опасных гидрометеорологических явлений, таких как паводки. Настоящее исследование посвящено оценке воздействия изменения климата и антропогенных факторов на формирование стока рек в Сусуманском районе, одном из центров золотодобычи в Магаданской области, с помощью математической модели «Гидрограф». Объектом исследования выбран бассейн реки Сусуман, где добыча золота и гидрометеорологические наблюдения начались в 30-х гг. прошлого века. По спутниковым данным Sentinel-2 доля нарушенных земель в

THE PROCESSES OF RIVER RUNOFF FORMATION IN THE PERMAFROST ZONE PERMAFROST UNDER MINING ACTIVITY IN RIVER VALLEYS (ON THE EXAMPLE OF GOLD MINING IN THE SUSUMAN RIVER BASIN, THE MAGADAN REGION)

Polina A. Nikitina[1], Andrey N. Shikhov[2], Olga M. Makarieva[3,1], Anastasiia A. Zemlianskova[3,1], Nataliia V. Nesterova[1,4]

[1]Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia; [2]Perm State University, Perm, Russia;[3]Northeastern State University, Magadan, Russia;[4]State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia

nikitinapolina243@gmail.com

Abstract. Gold mining in placer deposits in Eastern Siberia and the Far East plays an important role in the economy of these regions. The Magadan region ranks first in Russia, in this industry. However, an increase in production volumes is accompanied by negative impact onthe natural environment, including changes in riverbeds, destruction of vegetation, the increased water turbidity, etc. These changes can become a source of dangerous hydrometeorological phenomena such as floods. This study is devoted to assessing the impact of climate change and technogenic factors on the formation of river flow in the Susuman district, one of the gold mining centers in the Magadan region, using the Hydrograph mathematical model. The object of study was the Susuman River basin, where gold mining and hydrometeorological observations began in the 30s of the last century. According to Sentinel-2 satellite data, the proportion of mining-impacted lands in the Susuman river basin (up to the village of Tongora) is estimated at 8.8 % of the total area of the basin, including 3 % completely devoid of

Nikitina P. A., Shikhov A. N., Makarieva O. M., Zemlianskova A. A., Nesterova N. V. The processes of river runoff formation in the permafrost zone permafrost under mining activity in river valleys (on the example of gold mining in the Susuman river basin, the Magadan region). *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2023, vol. 5, iss. 3, pp. 244–255. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2023.5.3.244.

бассейне р. Сусуман (до п. Тонгора) оценена в 8,8 % от общей площади бассейна, в том числе 3 % полностью лишено растительности. На первом этапе исследований проведено моделирование процессов формирования стока в бассейне р. Сусуман за период 1966–1987 гг. без учета нарушенных территорий. Средний критерий Нэша-Сатклиффа за период моделирования составил 0,59, невязка годового слоя стока – 12 мм или 4 %. Результаты моделирования в значительной мере зависят от качества и репрезентативности входных метеорологических данных об осадках. Следующим этапом станет разработка параметров нарушенных ландшафтов и численных экспериментов по их верификации на основе гидрологической модели.

Ключевые слова: добыча золота; речной сток; нарушение земель; бассейн р. Сусуман; гидрологическая модель «Гидрограф».

vegetation. At the first stage of research, modeling of runoff formation processes in the Susuman river basin was carried out for the period 1966-1987 without taking into account mining-impacted areas. The average Nash-Sutcliffe criterion for the modeling period was 0.59 of the annual runoff layer is 12 mm or 4 %. Modeling results are highly dependent on the quality and representativeness of the input meteorological precipitation data. The next stage will be the development of parameters of mining-impacted landscapes and numerical experiments to verify them based on a hydrological model.

Keywords: gold mining; river runoff; land disturbance; the Susuman River basin; «Hydrograph» hydrological model.

Введение

Важным сектором экономики Восточной Сибири и Дальнего Востока является добыча золота на рудных и россыпных месторождениях. История развития отрасли в Магаданской области берет свое начало с 30-х гг. прошлого столетия. Рост объемов добычи россыпного золота сопровождается увеличением негативного воздействия на природную среду, в частности приводит к изменению морфологических и гидрографических характеристик водосборов рек [Lawrence et al., 2021]. Отсутствие системы мониторинга воздействия золотодобычи на окружающую среду в России не позволяет оценить масштабы экологических и экономических проблем, вызываемых такой деятельностью. Инвентаризация земель, подвергшихся воздействию, завершена только для бассейна р. Амур. На основе анализа данных дистанционного зондирования Земли показано, что площадь нарушенных земель составляет около 7 % площади бассейнов реки Амур (4200 км^2), но оценка их влияния на сток не проводилась [Egidarev, Simonov, 2015]. В Магаданской области площадь земель, нарушенных в результате добычи золота и полностью лишенных растительности составляет более 720 км^2, в том числе 260 км^2 − прирост их площади за последние 4–6 лет [Shikhov et al., 2023].

Разработка месторождений золота в Магаданской области осуществляется тремя методами, которые по-разному воздействуют на окружающую среду: дражный, карьерный и открытая разработка. Дражный метод применяется для добычи рассыпного золота, когда специальный механизм (драга), расположенный в русле реки, черпает породу, которой сложена долина и пойма реки, с целью дальнейшей переработки. Для эффективной работы драги необходим определенный уровень воды в дражном котловане, который регулируется благодаря искусственным плотинам и шлюзам. Вследствие разработки образуются галечно-эфельные отвалы, а промытый песок оседает на дно образовавшегося котлована. Основной особенностью карьерной разработки являются вскрышные работы, которые могут выполняться несколькими способами: а) с использованием взрывчатки; б) гидравлической оттайкой;

в) рыхлением. При применении гидравлической оттайки изменяется мощность многолетнемерзлых пород, а также увеличивается интенсивность глубинной и боковой эрозии. Рыхление и массовые взрывы приводят к уменьшению альбедо, что также может приводить к увеличению сезонно-талого слоя. Открытая добыча подразумевает повторную переработку ранее использованных массивов пород.

Таким образом, на участках речных долин и в руслах рек формируется сложная система искусственных водоемов (рисунок 1). Многочисленные пруды-отстойники и русловая сеть антропогенного происхождения подвержены процессам заиливания и заболачивания. Образуются дамбы, которые в периоды интенсивных осадков могут прорываться и приводить к формированию катастрофических паводков. Прорывные паводки и склоновый сток транспортируют в реки большой объем загрязняющих веществ. Наиболее характерным для рек золотодобывающих районов является загрязнение взвешенными веществами и тяжелыми металлами [Jarsjö et al., 2017; Илюшина и др., 2023]. Распространение многолетнемерзлых пород и антропогенные изменения геокриологического режима приводят к тому, что восстановление ландшафтов на нарушенных участках занимает продолжительное время. На основе данных космических снимков выявлено, что в пределах Тенькинского, Сусуманского и Ягоднинского районов Магаданской области, около 2 % площади территории нарушены в результате золотодобычи, из них только на 10 % наблюдаются процессы восстановления растительного покрова [Илюшина и др., 2023].

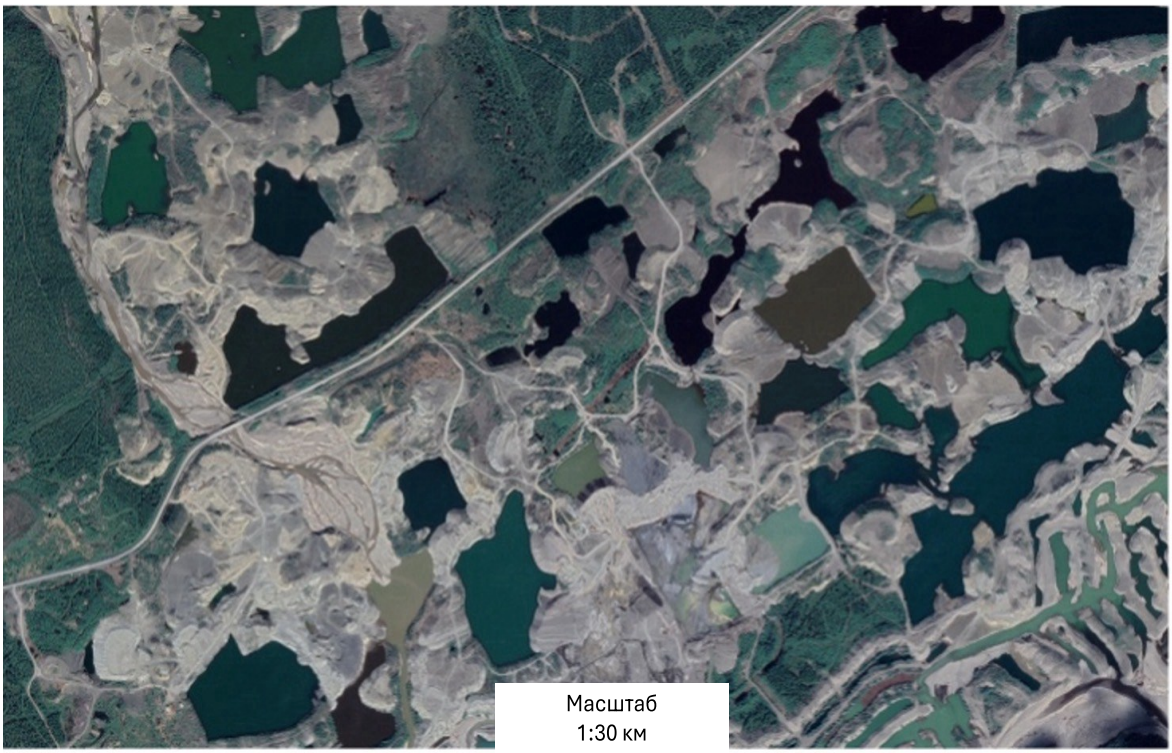


Рисунок 1. Спутниковый снимок нарушенных ландшафтов в долине р. Сусуман (Сусуманский район Магаданской области) с сервиса Google Earth

Figure 1. Landscapes impacted by gold mining in the Berelekh river valley (Susumansky district of Magadan region) (satellite image from Google Earth service)

Магаданская область относится к региону повышенного экономического риска вследствие воздействия опасных гидрометеорологических явлений [Zemtsov et al., 2014]. Расчеты производились на основе двух формул расчета риска «Мирового индекса риска» (WRI) и «Региональный Российский индекс риска» (RRIR). Полученные значения WRI в работе [Zemtsov et al., 2014] сравнимы с территориями Краснодарского края, для которого характерны

УДК 624.131.53 DOI: 10.34753/HS.2023.5.3.256

ОБ АППРОКСИМАЦИИ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ГРУНТА СДВИГУ ОТ НОРМАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ

А.Ю. Виноградов[1,2], В.А. Обязов[1,3]

[1]ООО НПО «Гидротехпроект», г. Валдай, Россия; [2]ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», г. Санкт-Петербург, Россия;
3 ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет», г. Санкт-Петербург, Россия
gd@npogtp.ru

Аннотация. Сопротивление грунтов сдвигу, зависит от их физического и напряженного состояния, и относится к основным прочностным характеристикам, определяющим мероприятия по защите от таких опасных процессов, как сели, размыв и разрушение коренных и аллювиальных пород берегов под воздействием прибоя и руслового потока, оползней и обвалов, а также используется при проектировании любых зданий и сооружений. В связи с этим получение расчетных величин прочностных свойств грунтов имеет весьма важное значение. Определение предельных нагрузок базируется на экспериментальной зависимости между давлением и сопротивлением грунтов сдвигу. Согласно нормативной документации, эта зависимость принята линейной, а определение касательного сопротивления сдвигу используемых при лабораторных исследованиях грунтов выполняется при нормальном давлении, чаще всего принимаемом равным 0,1, 0,2 и 0,3 МПа. Учитывая, что большинство существующих и проектируемых зданий и сооружений, в том числе сооружений инженерной защиты, имеют невысокую нагрузку на основание (менее 0,1 МПа), исследование образцов грунта было проведено не только в рекомендованном диапазоне нормального давления 0,1–0,3 МПа, но и при меньших его значениях. В случае

ABOUT THE APPROXIMATION OF THE DEPENDENCE OF SOIL SHEAR RESISTANCE ON NORMAL PRESSURE

Alexey Yu. Vinogradov[1,2], Viktor A. Obyazov[1,3]

[1]Scientific and Industrial Research Association "Gidrotehproekt", Valday, Russia;
[2] Saint Petersburg State Forest Technical University, St. Petersburg, Russia;
[3]Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia

gd@npogtp.ru

Abstract. Soil shear resistance, depending on their physical and stressed state, is characterized by basic strength characteristics. These characteristics determine measures to protect against such dangerous processes as mudflows, erosion and destruction of indigenous and alluvial rocks of the shores under the influence of surf and channel flow, landslides, as well as during the construction of any buildings and structures. In this regard, obtaining calculated values of the strength properties of soils is crucial. The determination of limit loads is based on the experimental relationship between pressure and soil shear resistance. According to the regulatory documentation, this dependence is assumed to be linear, and the determination of the shear resistance of soils used in laboratory studies is performed at normal pressure, most often assumed to be 0.1, 0.2 and 0.3 MPa. Considering that most existing and projected buildings and structures, including engineering protection structures, have a low load on the base (less than 0.1 MPa), the study of soil samples was carried out not only in the recommended range of normal pressure of 0.1–0.3 MPa, but also at lower values. In the case of standard loads recommended by GOST, the dependence of soil shear resistance on normal pressure can be approximated by a straight line. But in the area of relatively low pressures, this dependence is nonlinear. This pattern was

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

стандартных, рекомендованных ГОСТ, нагрузок зависимость сопротивления грунта сдвигу от нормального давления вполне можно аппроксимировать прямой линией. Но в области относительно малых давлений эта зависимость является нелинейной. Указанная закономерность подтвердилась при всех многочисленных лабораторных испытаниях на образцах как связных, так и несвязных грунтов, подготовленных согласно соответствующей нормативной документации, а также на пробах монолитов связного грунта, отобранного непосредственно из береговых обнажений. Подобные результаты ранее получал и один из основоположников отечественного грунтоведения Н.А. Цытович. Однако в более поздних работах он перевел акцент именно на линейную составляющую исследуемой зависимости. Подбор наиболее подходящей функции для ее аппроксимации, выполненный в данной работе, показал, что она является степенной.

Ключевые слова: грунты; связные грунты; несвязные грунты; сопротивление сдвигу; нормальное давление; сцепление; внутреннее трение.

confirmed in all numerous laboratory tests on samples of both cohesive and non-cohesive soils prepared in accordance with the relevant regulatory documentation, as well as on samples of monoliths of cohesive soil taken directly from coastal outcrops. Similar results were previously obtained by one of the founders of Russian soil science N.A. Cytovich. However, in later works, he shifted the focus specifically to the linear component of the dependence under study. The selection of the most suitable function for its approximation, performed in this paper, showed that it is a power function.

Keywords: soils; cohesive soils; non-cohesive soils; shear resistance; normal pressure; adhesion; internal friction.

Введение

При проектировании сооружений инженерной защиты от таких опасных процессов как сели – в случае транспортно-сдвигового процесса [Виноградов, 1980], размыв и разрушение коренных и аллювиальных пород берегов под воздействием прибоя и руслового потока, оползней и обвалов существенное значение приобретает получение расчетных величин прочностных свойств грунтов[1,2]. Эти свойства важно знать при возведении любых зданий и сооружений[3]. Основным прочностным показателем грунтов является сопротивление сдвигу, зависящее от физического и напряженного состояния [Цытович, 1963].

Критичной ситуацией для грунтов при нагружении является сдвиг по поверхности с наименьшей несущей способностью. Разрушение грунта происходит при преодолении тангенциальным напряжением предела прочности на сдвиг, обусловленного внутренним трением и сцеплением грунта.

«Единственная причина разрушения грунта – образование сдвига. Осадки в этой фазе нагрузок становятся неравномерными и порывистыми, эпюра осадок приобретает неправильный характер. Кроме вертикальных осадок появляются сдвиги фундаментов в

[1] СП 116.13330.2012 Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения.
[2] СП 436.1325800.2018. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от оползней и обвалов. Правила проектирования.
[3] СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений.

сторону» [Герсеванов, 1948]. Следовательно, характеристиками, определяющими величину деформации грунтов, в том числе при нагрузках, превышающих критические, являются сцепление и внутреннее трение.

Определение предельных нагрузок в основаниях сооружений, прогноз устойчивости откосов при оползнях природных склонов и устойчивости земляных сооружений – все это базируется на экспериментальной зависимости между давлением и сопротивлением грунтов сдвигу [Цытович, 1963.]. Эта зависимость принята линейной[4,5]. Согласно ГОСТ, коэффициент при функции – традиционно определяемый как угол внутреннего трения ($tg\varphi$) и свободный член уравнения (c) – как сцепление, увязаны между собой в тангенциальное напряжение: $\tau = \sigma \cdot tg\varphi + c$, где σ – нормальное, а τ – тангенциальное давления. Данное уравнение известно как закон Кулона для сыпучих и связных грунтов: сопротивление грунтов сдвигу есть функция первой степени от нормального давления [Цытович, 1983]. С физической точки зрения данное напряжение является напряжением, **удерживающим** грунтовое тело от сдвига. Чем выше значения сцепления и угла внутреннего трения, тем более устойчивым является грунт [Виноградов Ю.Б., 1980].

Параметры механических свойств грунтов, (угол внутреннего трения φ, удельное сцепление c) необходимо оценивать согласно требованиям всех основных регламентирующих документов: СП 22.13330.2016[3] (п. 2.10), СП 50-101-2004[6] (п. 5.3.1), СП 23.13330.2018[7] (п. 2.3).

Материалы и методы

При проведении исследований использованы пробы грунта различного гранулометрического состава как связные (супеси), так и несвязные (песок среднезернистый), подготовленные согласно ГОСТ 12248.1-2020[4]. Кроме того, лабораторным исследованиям были подвержены пробы монолитов связного грунта (супесь), отобранного непосредственно из береговых обнажений безымянного притока р. Порусья. Всего проведено 67 исследований специально подготовленных грунтов и 28 исследований монолитов. Все образцы по показателям текучести $I_L < 1{,}0$.

Согласно п. 3.3 ГОСТ 12248.1-2020[4] испытания на срез грунта проводится методом только консолидированно-дренированного среза. В предыдущем ГОСТ 12248-2010[8], согласно п. 5.1.1.4, предложены к использованию два метода:

- консолидированно-дренированный (медленный) срез – для песков, глинистых и органоминеральных грунтов независимо от их коэффициента водонасыщения для определения эффективных значений φ^I и c^I;

- неконсолидированный быстрый срез – для водонасыщенных глинистых и органоминеральных грунтов, имеющих показатель текучести 0,5, и просадочных грунтов, приведенных в водонасыщенное состояние замачиванием без приложения нагрузки, для определения φ и c в нестабилизированном состоянии.

Сравнительный анализ прочностных характеристик грунтов, полученных этими методами, остается за рамками настоящей статьи. Один из основоположников отечественного грунтоведения – Н.А. Цытович – считал заслуживающими доверия именно результаты консолидированно-дренированного среза. В данной работе использовался метод консолидированно-дренированного среза.

При быстром срезе влажность и плотность грунта не успевают измениться, при медленном – каждому шагу нормального давления соответствуют свои плотность и влажность грунта, т.е. испытаниям подвергается априори различный грунт. В качестве варианта решения этой проблемы Н.А. Цытович предложил вначале загрузить грунт максимально возможным давлением при планируемых испытаниях, потом

[4] ГОСТ 30416-2020. Грунты. Лабораторные испытания. Общие положения.
[5] ГОСТ 12248.1-2020. ГОСТ 12248.1-2020. Грунты. Определение характеристик прочности методом одноплоскостного среза.
[6] СП 50-101-2004. Проектирование и устройство оснований и фундаментов зданий и сооружений.
[7] СП 23.13330.2018. Основания гидротехнических сооружений.
[8] ГОСТ 12248-2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости.

разгрузить его и в дальнейшем подвергать испытаниям полученную заготовку [Цытович, 1963]. Таким образом, грунт для испытаний будет действительно однородным, но он будет иметь мало общего с первоначальным грунтом, следовательно, результаты испытаний можно будет использовать только после соответствующей интерпретации. К сожалению, подобной интерпретации нет, и дискуссия на эту тему отсутствует.

Согласно ГОСТ 12248.1—2020[4] определение касательного сопротивления сдвигу используемых нами при лабораторных исследованиях грунтов выполняется при нормальном давлении, равном 0,1, 0,2 и 0,3 МПа. Однако, большинство существующих и проектируемых зданий и сооружений имеют малую этажность и невысокую нагрузку на основание (таблица 1).

Таблица 1. Средняя нагрузка на грунт, создаваемая различными зданиями и сооружениями
Table 1. Average ground load generated by various buildings and structures

№	Наименование	Тип сооружения	Проект	Расчетное давление, МПа
1	Котельная	Типовой проект блочно-модульной котельной 4,0 МВт	903-1-312.96	0,05
2	Школа	Типовой проект средней образовательной школы	225-1-413	0,052
3	Канализационные очистные сооружения	Типовой проект канализационных очистных сооружений 25 м^3/сут	402-22-61.86	0,038
4	Производственный корпус по изготовлению железобетонных изделий	Типовой проект завода железобетонных изделий мощностью 50 тыс. м^3/год	409-10-44	0,033 (0,068*)
5	9 этажный кирпичный жилой дом	Типовой проект жилого дома 9 этажей	85-012/1.2	0,122

* давление наиболее нагруженной части сооружения

Усредненный вес 1 м^3 зданий и сооружений с учетом полезной загрузки составляет 6,5 кН, т.е. давление, оказываемое 1 м^3 условного здания на 1 м^2 составляет 0,0065 МПа, следовательно, осредненное давление шестиэтажного здания на грунт не превышает 0,1 МПа.

Таблица 2. Средняя этажность по городам РФ [https://info.2gis.ru/ufa/company/news/2gis-podschital-srednyuyu-etazhnost-gorodov]
Table 2. Average number of floors by cities of the Russian Federation

Город	Этажность
Москва	6
Санкт-Петербург, Уфа, Екатеринбург, Казань, Воронеж, Челябинск, Красноярск	5
Новосибирск, Липецк, Пермь, Нижний Новгород, Саратов, Рязань, Самара, Владивосток, Волгоград, Иркутск	4
Краснодар, Астрахань	3

Поскольку средняя этажность по городам РФ не превышает 6 этажей ни в одном городе (таблица 2), можно сделать вывод, что большинство построенных и проектируемых зданий и сооружений в стране создают давление на грунт меньшее, чем рекомендованная ГОСТ величина 0,1 МПа. Все сооружения инженерной защиты, водопропускные и водоотводные попадают в диапазон 0,01–0,02 МПа.

Учитывая данное обстоятельство, проведенное нами исследование образцов грунта выполнялось не только в рекомендованном диапазоне нормального давления 0,1–0,3 Мпа, но и при его значениях, меньших 0,1 Мпа.

Результаты

В случае стандартных, рекомендованных ГОСТ, нагрузок зависимость $\tau = f(\sigma)$ вполне можно аппроксимировать прямой линией (рисунок 1а). Но в области относительно малых давлений эта зависимость становится нелинейной. Наиболее подходящей функцией для ее аппроксимации является степенная (рисунок 1б).

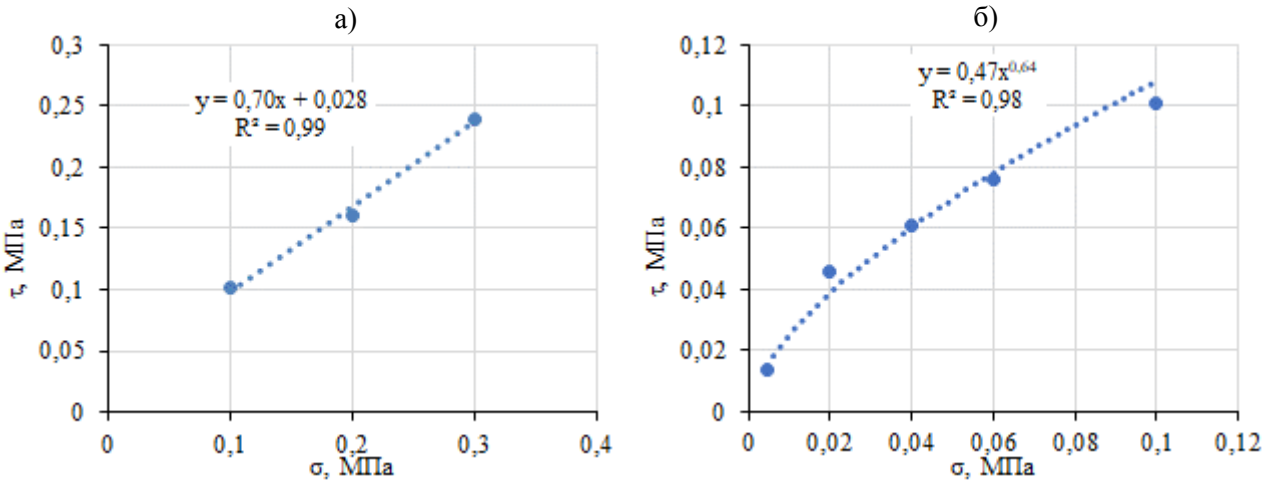


Рисунок 1. Диаграммы сопротивления сдвигу крупнозернистого песка при нормальном давлении 0,1–0,5 МПа (а) и меньше 0,1 МПа (б)

Figure 1. Diagrams of shear resistance of coarse-grained sand at normal pressure of 0.1–0.5 MPa (a) and less than 0.1 MPa (b)

На основании наших множественных испытаний несвязных грунтов на плоскостной сдвиг можно сделать вывод, что при нормальных нагрузках 0,1 МПа и менее диаграмма имеет ярко выраженную степенную зависимость и ***не*** представляет собой прямой, исходящей из начала координат (рисунок 2).

Обсуждение

В рамках нашего рассмотрения интересна трансформация интерпретации результатов зависимости сопротивления сдвигу от нормального давления σ в ранних [Цытович, 1940] (рисунок 3а) и поздних трудах Н.А. Цытовича [Цытович, 1963; Цытович, 1983] (рисунок 3б).

Н. А. Цытович [Цытович, 1940] предлагает рассматривать полученную диаграмму как состоящую из двух частей: с большей кривизной от 0 до σ_φ, и прямолинейной: от σ_φ до нормального давления 0,5–1,0 МПа. В указанной работе величина σ_φ принята для глин 0,05–0,07 МПа, для песков – 0,1 МПа и выше.

В свою очередь, сопротивление грунта сдвигу на криволинейном участке слагается также из двух частей – первой, соответствующей нулевому давлению (c) – молекулярное сцепление грунта и второй, изменяющейся по криволинейному закону.

Для криволинейного участка тангенс угла является величиной переменной. Для линейного, с достаточной для практических целей точностью, по мнению Н. А. Цытовича, тангенс считается величиной постоянной [Цытович, 1940]. Данное утверждение является спорным, поскольку автор не обозначил критериев, на основании которых он его выдвинул и обосновал.

В последующей своей фундаментальной работе [Цытович, 1963], Н. А. Цытович указывал, что коэффициент внутреннего трения связных грунтов может считаться величиной постоянной только при полном уплотнении грунта во время испытания.

Загружая грунт максимально возможным давлением с последующей разгрузкой, мы имеем дело с новым образцом, возможно, кардинально отличающимся от первоначального. Понимания у проектировщика, как будет вести себя естественный грунт при планируемых воздействиях априори быть не может.

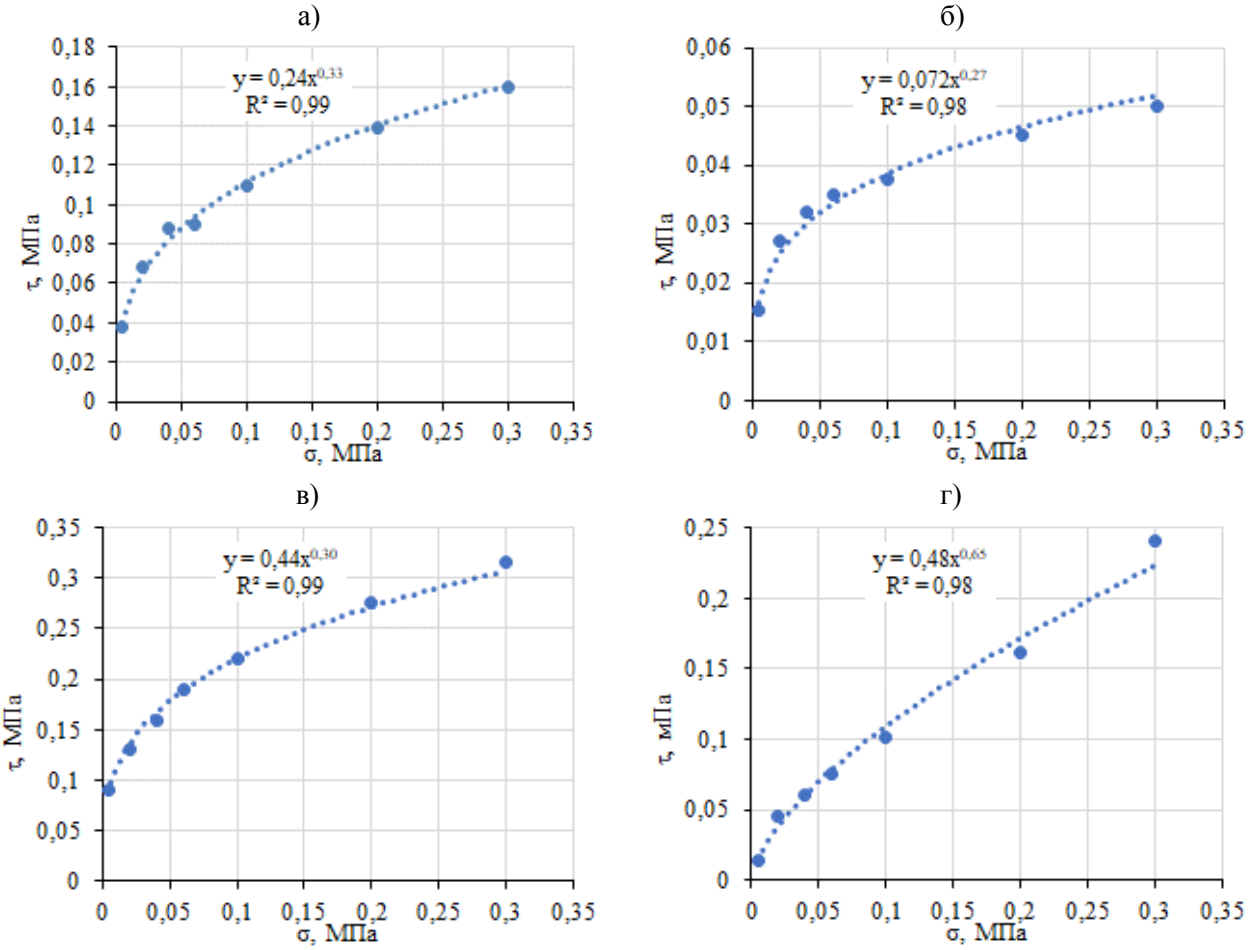
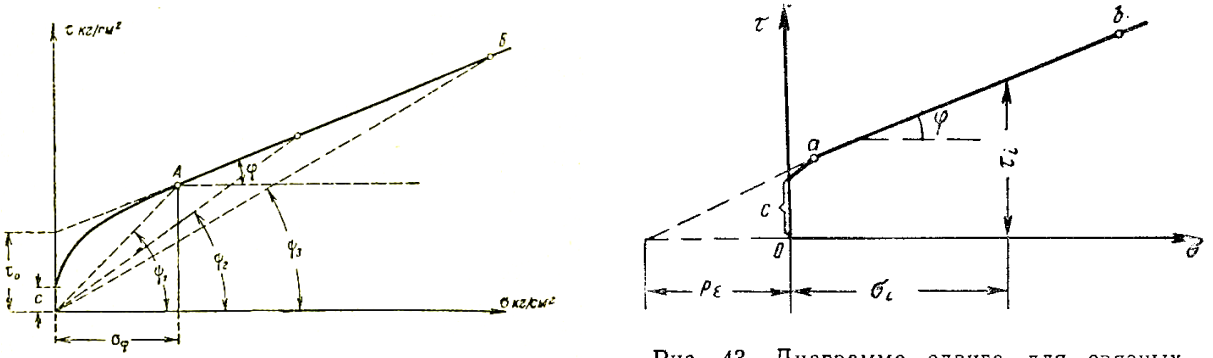


Рисунок 2. Диаграммы сопротивления сдвигу для связных и несвязных грунтов:
а – супесь с плотностью 1,96 т/м^3 и влажностью 0,2; б – супесь с плотностью 2,04 т/м^3 и влажностью 0,2; в – супесь (монолит) с плотностью 2,08 т/м^3 и влажностью 0,23; г – песок среднезернистый с плотностью 2,12 т/м^3 и влажностью 0,14

Figure 2. Shear resistance diagrams for cohesive and non–cohesive soils:
a – sandy loam with a density of 1.96 t/m^3 and a humidity of 0.2; b – sandy loam with a density of 2.04 t/m^3 and a humidity of 0.2; c – sandy loam (monolith) with a density of 2.08 t/m^3 and a humidity of 0.23; d – medium-grained sand with a density of 2.12 t/m^3 and humidity 0.14

а) б)



Фиг. 32. Диаграмма зависимости сопротивления сдвигу от давления.

Рис. 43. Диаграмма сдвига для связных грунтов при консолидированно-дренированном испытании

Рисунок 3. Диаграмма зависимости касательного сопротивления сдвигу τ от нормального напряжения σ: а – [Цытович, 1940]; б – [Цытович, 1963]

Figure 3. Diagram of the dependence of the tangential shear resistance τ on the normal voltage σ: a – [Cytovich, 1940]; b – [Cytovich, 1963]

Для несвязных грунтов (пески), при нормальном давлении в диапазоне 0,1–0,5 МПа [Цытович, 1963] изменениями плотности можно пренебречь. Как показывают результаты многочисленных испытаний, для сыпучих грунтов, диаграмма сопротивления сдвигу представляет собой строго прямую, исходящую из начала координат под углом φ к оси нормальных давлений [Цытович, 1963]. Сопротивление сыпучих грунтов сдвигу есть сопротивление их трению, прямо пропорциональное нормальному давлению.

По Н. А. Цытовичу, практике необходимо значение максимально возможного сопротивления грунтов сдвигу. На наш взгляд, как практикующих инженеров, это утверждение спорно. Для сооружений инженерной защиты важно знать ***минимально*** возможное сопротивление ***ненагруженного*** грунта, поскольку именно оно определяет начальную устойчивость массива грунта.

Далее по Н. А. Цытовичу – «многочисленные испытания связных грунтов на сопротивление их прямому сдвигу показывают, что все экспериментальные точки (при давлениях меньших 0,7 МПа) весьма точно укладываются на прямую линию» [Цытович, 1963, с. 172]. Криволинейная часть диаграммы в поздней монографии практически вышла из рассмотрения и на соответствующем рисунке почти не видна (рисунок 3б).

Наш опыт подсказывает, что все диаграммы $\tau = f(\sigma)$ имеют ярко выраженную степенную зависимость (см. рисунок 2). Функциональная зависимость сопротивления сдвигу от нормального давления по раннему Н.А. Цытовичу также представляет собой степенную функцию вида $\tau = a \cdot \sigma^b$ (см. рисунок 3а).

Основная часть грунтоведения, построенная на оценке прочностных свойств грунтов по принципу линейности уравнения Кулона, имеет область интересов за пределами реальной жизни. Значения касательного напряжения большинства связных грунтов при нормальных нагрузках 0,05–0,25 МПа так же неплохо аппроксимируются степенной зависимостью.

По сути, задача сводится к подбору уравнения, наилучшим образом аппроксимирующего полученные эмпирическим путем значения тангенциальных сдвиговых напряжений в зависимости от нормальной нагрузки, приложенной к образцу. Простой оценкой величины достоверности аппроксимации является сравнительное значение R^2 (таблица 3).

Таблица 3. Аппроксимация различными зависимостями функции сопротивления сдвигу от нормального давления. Суглинок полутвердый, Тверская обл., данные 2002, 2020 гг.
Table 3. Approximation of the shear resistance function by various dependencies on normal pressure. Semi-solid loam, Tver region, data for years 2002, 2020

Скважина №	Глубина, м	Зависимость		
		линейная	степенная	логарифмическая
6338	17,2	1,000	0,999	0,978
	17,5	0,977	0,990	1,000
6339	20,2	0,999	1,000	0,987
	20,8	0,999	1,000	0,986
3	16,5	0,998	0,992	0,962
	14,6	0,999	0,995	0,974
14	22	0,935	0,883	0,842
15	22,2	0,994	0,970	0,949
	22,8	1,000	0,992	0,978

Действительно, прямая зависимость ($y = ax + b$), в среднем, неплохо аппроксимирует три эмпирические значения τ, полученные по заданным, согласно требованиям ГОСТ, нормальным значениям σ, хотя полученные результаты чаще всего и выходят за область

практического интереса. Как отметил еще Терцаги [Терцаги, 1961], результаты испытаний грунтов на сдвиг могут быть с ***некоторой*** точностью выражены зависимостью Кулона. Однако, если мы изучаем реальный грунт и хотим оценить его поведение в природных условиях или при обычных нагрузках – мы должны провести испытания при нормальных напряжениях в диапазоне 0–0,3 МПа не менее, чем в 6–7 точках. В этом случае, сомнений в правильности выбора степенной зависимости у нас не будет.

Выводы

1. Линейный вид уравнения сопротивления сдвигу вида $\tau_i = a\sigma_i + b$ с учетом значений из диапазона относительно малых давлений не соответствует эмпирическим данным.

2. Наилучшее совпадение наблюденным значениям дает степенное уравнение вида $\tau_i = a(\sigma_i)^b$, аппроксимирующее зависимость сопротивления грунта сдвигу от нормального давления.

Литература

Виноградов Ю.Б. Этюды о селевых потоках. Гидрометеоиздат, 1980. 144 с.

Герсеванов Н.М. Свайные основания и расчет фундаментов сооружений. М.: Стройвоенмориздат, 1948. 270 с.

Терцаги К. Теория механики грунтов. М.: Гостройиздат, 1961. 507 с.

Цытович Н.А. Механика грунтов. Л.–М.: Государственное издательство строительной литературы, 1940. 389 с.

Цытович Н.А. Механика грунтов: [Учеб. пособие для гидротехн. и строит. специальностей вузов]. 4-е изд., вновь перераб. и доп. М.: Госстройиздат, 1963. 636 с.

Цытович Н.А. Механика грунтов (краткий курс): Учебник для строит. вузов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1983. 288 с.

References

Vinogradov Yu. B. *Etyudy o selevyh potokah [Studies on mudflows]*. Hydrometeoizdat, 1980. 144 p.

Gersevanov N.M. *Svajnye osnovaniya i raschet fundamentov sooruzhenij [Pile foundations and calculation of foundations of structures]*. M: Publ. Strojvoenmorizdat, 1948. 270 p. (In Russian).

Terczagi K. *Teoriya mexaniki gruntov [Theory of soil mechanics]*. M: Publ. Gostrojizdat, 1961. 507 p. (In Russian).

Cytovich N.A. *Mexanika gruntov [Soil mechanics]*. Leningrad–Moskva: Publ. Gosudarstvennoe izdatel`stvo stroitel`noj literatury`, 1940. 389 p. (In Russian).

Cytovich N.A. *Mexanika gruntov: [Ucheb. posobie dlya gidrotexn. i stroit. special`nostej vuzov]. 4-e izd., vnov` pererab. i dop. [Soil mechanics: [Textbook for hydraulic engineering. and builds. university specialties]*. M: Publ. Gosstrojizdat, 1963. 636 p. (In Russian).

Cytovich N.A. *Mexanika gruntov (kratkij kurs): Uchebnik dlya stroit. vuzov. 4-e izd., pererab. i dop. [Soil Mechanics (short course): A textbook for builds. universities. 4th edition revised and expanded]*. M: Publ. Vy`sshaya shkola, 1983. 288 p. (In Russian).

регулярные наводнения, сели и нестабильная метеорологическая обстановка. Оба региона определены в категорию очень высокого риска воздействия. Оценка риска опасных гидрометеорологических явлений по методу RRIR, определила Магаданскую область как территорию высокого риска, и она уступает Краснодарскому краю в рассчитанных значениях RRIR. С повышенными экономическим и социальным рисками также связан нестационарный климат Дальнего Востока. Согласно [Третий оценочный …, 2022], в регионе ожидается увеличение водности рек, что повышает риски затопления. К 2050 г. прогнозируют увеличение экстремумов суточного количества осадков, повышение среднегодовой температуры воздуха на 5 °С и деградацию многолетней мерзлоты. Перечисленные происходящие процессы изменения природной среды способствуют формированию экстремальных паводков. Обобщая приведенные факты, можно сказать, что на сток рек района исследования влияют климатические и антропогенные факторы.

В литературных источниках практически нет информации о количественном изменении речного стока вследствие горнодобывающей деятельности. Схожим процессом, влияющим на подстилающую поверхность путем удаления растительного покрова, является лесной пожар. На территориях, лишенных растительного покрова часто максимальные расходы воды с малых водосборов в разы, превышают максимальные величины, наблюдаемые в ненарушенных условиях [Gartner et al., 2004; Moody et al., 2008]. Также нарушенные территории могут способствовать формированию катастрофических паводков [Neary, Gottfried, 2002; Pausas et al., 2008]. В работе [Семенова и др., 2015] для водосбора, расположенного в зоне распространения многолетней мерзлоты, показано увеличение объема ливневых паводков после пожара на 30–40 %.

По аналогии с территориями, лишенными растительности в результате лесных пожаров, можно предположить наличие эффекта комплексирования климатических и антропогенных (горнодобывающая деятельность) факторов формирования паводков на территории Магаданской области.

Одним из центров золотодобычи Магаданской области является Сусуманский район. В г. Сусумане в последние годы катастрофические наводнения наблюдались в 2016 и 2019 гг. Для предотвращения паводков в г. Сусуман в 2016 г.[1] были проведены мероприятия по берегоукреплению. Однако, они не помогли избежать наводнения в этот и последующие годы. Из средств массовой информации, достоверно известно о трех случаях, нанесших значительный ущерб: 13–14 июня 1995 г.[2], 27–28 августа 2016 г.[3], 6–7 августа 2019 г.[4] В то же время в регионе отсутствует система прогнозирования опасных гидрологических явлений ввиду редкой гидрометеорологической сети наблюдений. Например, в бассейне р. Сусуман с 1987 г. не измеряются расходы воды, хотя ранее здесь действовали гидрологические посты.

Целью данного исследования является количественная оценка вклада климатического изменения и антропогенного воздействия (нарушение ландшафтов речных долин и деформация русел) в формирование опасных гидрометеорологических явлений на реках Магаданской области, в том числе, на основе методов моделирования. В качестве объекта исследования принят бассейн р. Сусуман, на территории которого добыча золота и гидрометеорологические наблюдения были начаты в 30-х гг. прошлого века. На первом этапе решены следующие задачи: 1) на основе космических снимков проведена оценка площади

[1] Укрепление дамбы [Эл. ресурс] URL: https://www.49gov.ru/press/press_releases/?id_4=17630&ysclid=lniwydvia5496350774, дата обращения на сайт 10.09.2023 г.
[2] Наводнение 1995 года [Эл. ресурс] URL: https://furyrec.livejournal.com/15078.html?ysclid=lnsvgph1kj217793867, дата обращения 10.09.2023 года
[3] Наводнение 2016 года [Эл. ресурс] URL: https://ria.ru/20160828/1475464820.html?ysclid=lnsvhat67z163375361, дата обращения 10.09.2023 г.
[4] Наводнение 2019 года [Эл. ресурс] URL: https://vesmatoday.net/news/post/8921-v-susumanskom-rayone-?ysclid=lnsvhrgsky303296341, дата обращения 10.09. 2023 г.

нарушенных земель в бассейне р. Сусуман; 2) проведена параметризация и верификация гидрологической модели для бассейна р. Сусуман.

Объект исследования

Бассейн р. Сусуман расположен в Сусуманском районе Магаданской области. Река является левым притоком р. Берелёх, которая является притоком второго порядка для р. Колымы. Относится к верховьям р. Колымы и берет свое начало в нескольких километрах к югу от горы Морджот – обособленного массива, входящего в хребет Черского [Шпикерман и др., 2016]. Площадь бассейна в створе Тонгора составляет 932 км^2, его характеристики представлены в таблице 1. Река протекает по территории распространения сплошной многолетней мерзлоты на высотах 691–1968 м, что относится к зоне подгольцовых редколесий. Также на таких высотах выделяются обнаженные горные породы и скалистые тундровые участки [Королев, 1985].

Климат территории резко континентальный, с длительным (7 и более месяцев) холодным периодом года, с абсолютным минимумом −60,6 °С в январе. Тёплый период года длится с третьей декады мая по сентябрь. Максимальные температуры наблюдаются в июле, абсолютный максимум составил 35 °С. Средняя многолетняя температура (1937–2023 гг.) по данным метеостанции Сусуман (655 м), составляет −12,5 °С, средняя многолетняя сумма осадков – 312 мм.

Гидрологический режим реки относится к дальневосточному типу и отличается высокими дождевыми паводками, которые соединяются с весенним половодьем, а иногда и превышают его по максимальным значениям расхода воды. Летом река переходит в непродолжительную фазу межени, а зимой перемерзает.

Таблицы 1. Характеристики водосбора р. Сусуман (пост р. Сусуман – пос. Тонгора**)**
Table 1. Characteristics of Sysyman river basin (the Susuman river – Tongora village)

Показатель, единица измерения	Значение
Код поста	01076
Период наблюдений за расходом воды	1941–1987
Площадь водосбора, км^2	932
Максимальная/минимальная/средняя высота водосбора, м	1968/691/1001
Средневзвешенный уклон, º	5,53
Средний/максимальный суточный расход воды за период наблюдений, м3/с	8,42/346

Материалы и методы

Оценка площади нарушенных земель в бассейне р. Сусуман по спутниковым данным

Использование спутниковых снимков миссии Sentinel-2 с пространственным разрешением 10 м и повторяемостью съемки каждые 2–3 дня позволяет объективно оценить площади нарушенных при золотодобыче земель и их динамику, несмотря на относительно невысокую повторяемость безоблачных дней в летний сезон и короткую продолжительность вегетационного периода. В рамках настоящей работы по снимкам Sentinel-2 были решены следующие задачи:

– оценена площадь земель, нарушенных при золотодобыче и полностью лишенных растительности (в полуавтоматическом режиме на основе нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI).

– оценена площадь всех земель с признаками нарушения золотодобычей на основе текстурных признаков (методом визуального дешифрирования).

Методика оценки площади нарушенных земель по разновременным снимкам, полученным в вегетационный период (в июле-августе), детально описана в работе [Shikhov et al., 2023].

Моделирование процессов формирования стока с учетом нарушенных территорий

Для исследования процесса формирования стока используется распределенная, физически обоснованная гидрологическая модель

«Гидрограф» [Виноградов, Виноградова, 2010]. Модель «Гидрограф» применяется в масштабе от единичной почвенной колонки до бассейнов крупных рек без изменения структуры и набора параметров для идентичных ландшафтов. Результатами моделирования является сток воды в замыкающем створе, водный баланс, распределенные переменные состояния ландшафтов – характеристики снежного покрова, температура и влажность почвы на разных горизонтах, глубина протаивания и промерзания и другие. В качестве входной информации модель использует данные о температуре и дефиците влажности воздуха и количестве осадков суточного или часового разрешения. Упрощенная входная информация позволяет применять модель на малоизученных бассейнах.

Параметризация модели осуществляется путем выделения однородных ландшафтов по характеристикам почвенно-растительного покрова, влияющих на формирование стока. Благодаря разделению водосбора на стокоформирующие комплексы (СФК), модель позволяет учитывать изменения в ландшафте, такие как лесные пожары [Семенова и др., 2015], вырубка деревьев и урбанизация, которые могут быть описаны с использованием динамического набора параметров, что делает ее пригодной для численных экспериментов в целях исследования процессов формирования стока. Модель неоднократно применялась для расчетов характеристик стока рек в условиях горной криолитозоны Северо-Востока России [Макарьева и др., 2020].

В качестве входной гидрометеорологической информации используется суточные данные метеостанции Сусуман (24790) и суточные значения расхода воды гидропоста р. Сусуман – пос. Тонгора (01076).

Таблица 2. Значения параметров нарушенного ландшафта для бассейна р. Сусуман
Table 2. Values of the parameters of the disturbed landscape for Susuman river basin

Показатель, единца измерения	Значение
Общая площадь нарушенных земель, км^2/%	82,1/8,8
Площадь нарушенных земель, лишенных растительности, км^2/%	27,0/3,0
Прирост площади нарушенных земель за 2016–2022 гг., км^2/%	10,3/1,1
Площадь участков нарушений с восстанавливающейся растительностью, км^2/%	43,8/4,7
Площадь буферных зон, км^2	170,2
Площадь нарушенных земель в буферной зоне, км^2/%	60,1/35,3

Результаты

Оценка площади нарушенных земель в бассейне р. Сусуман по спутниковым данным

Добыча золота в бассейне р. Сусуман началась более 80 лет назад и продолжается в настоящее время [Khristov, 2018]. В целом, в бассейне р. Сусуман, до замыкающего створа пос. Тонгора, площадь нарушенных территорий составляет 82,1 км^2 (8,83 %) из них 10,3 км^2 – прирост с 2016 г (рисунок 2а, таблица 2). При этом наиболее существенное воздействие золотодобычи на наземные экосистемы связано с добычей россыпного золота в речных долинах. Для оценки степени преобразованности речных долин построена буферная зона вдоль русел рек общей шириной 1000 м, ее площадь на территории бассейна составляет 170 км^2. Учитывая как нынешние, так и исторические горные выработки, на которых растительность уже восстановилась, а также искусственные водоемы, более 35 % площади долинных ландшафтов в бассейне р. Сусуман преобразованы золотодобычей (рисунок 2б). Такое серьезное воздействие на поймы приводит к существенному увеличению мутности воды [Илюшина и др., 2023].

Наряду с деградацией земель в исследовании оценивалось восстановление растительности на исторических участках золотодобычи. Анализ значений NDVI по снимкам Landsat, полученным в 2000, 2009 и 2021 гг., показал значительное восстановление растительности в районах, пострадавших от добычи золота до 2000 г. Участки нарушений возрастом от 20–30 лет и более уже невозможно

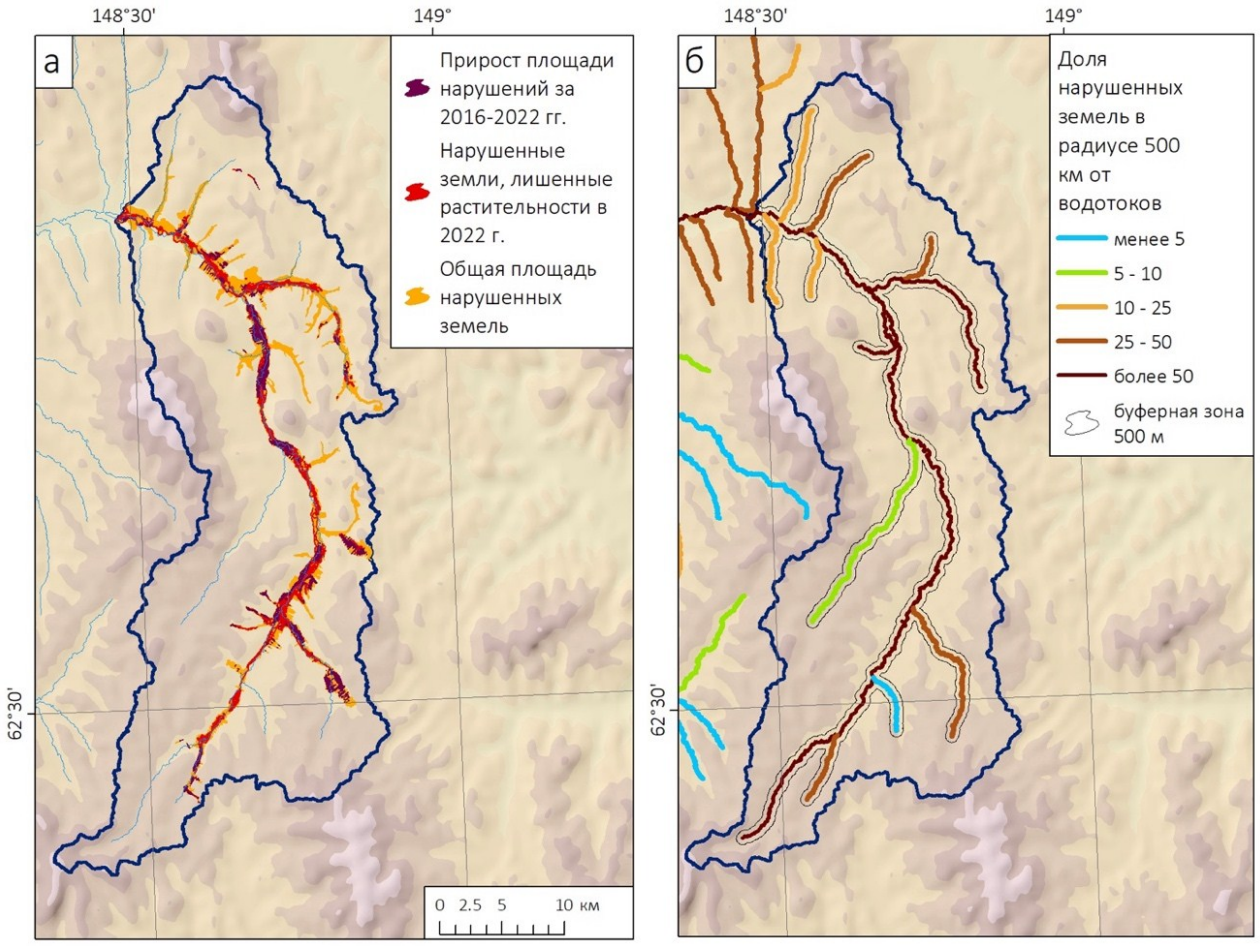


Рисунок 2. Пространственное распределение нарушенных земель в долине р. Сусуман по снимкам Sentinel-2: а) Нарушенные территории для всего бассейна реки; б) Распределение долей нарушенных территорий в буферных зонах

Figure 2. Spatial distribution of mining-impacted areas in the Sysyman river valley according to Sentinel-2 images: a) Disturbed territories for the entire river basin; b) Distribution of the shares of disturbed territories in buffer zones

выявить на основе разности NDVI. Основным отличительным признаком нарушенных земель, на которых уже восстановился растительный покров, является характерная текстура изображения, связанная с густой сетью искусственных водоемов и проток, а также сформированных драгой элементов рельефа. Такие участки хорошо различимы на снимках летнего периода, и они были выделены в интерактивном режиме (оцифрованы вручную). Их общая площадь составила 43,8 км^2, или 4,7 % от всей площади бассейна р. Сусуман в замыкающем створе пос. Тонгора. (таблица 2).

Параметризация и верификация гидрологической модели в бассейне р. Сусуман

На первом этапе исследования была проведена оценка применимости модели «Гидрограф» для расчетов характеристик стока в исследуемом бассейне. Моделирование процессов формирования стока проводилось без учета нарушенных территорий, а для параметризации бассейна р. Сусуман использовалась ранее опубликованная схема параметров модели для бассейнов верховьев р. Колымы [Макарьева и др., 2020], разработанная на основе анализа материалов Колымской водно-балансовой станции (1948–1997 гг.) [Makarieva et al., 2017]. Согласно предложенной схеме, в пределах бассейнов было выделено четыре стокоформирующих комплекса: гольцы, склоны северной экспозиции, склоны южной экспозиции и речная долина (таблица 2, рисунок 3).

Таблица 3. Распределение СФК исследуемого бассейна
Table 3. Distribution of the RFCs of the studied basins

Тип СФК	Отметка высот/средняя высота, м	Площадь бассейна р. Сусуман, км^2 (%)
Гольцы	> 1000	415 (44,6)
Склоны	700–1000	486 (52,2)
Речная долина	<700	2,6 (0,3)
Количество РТ	–	17

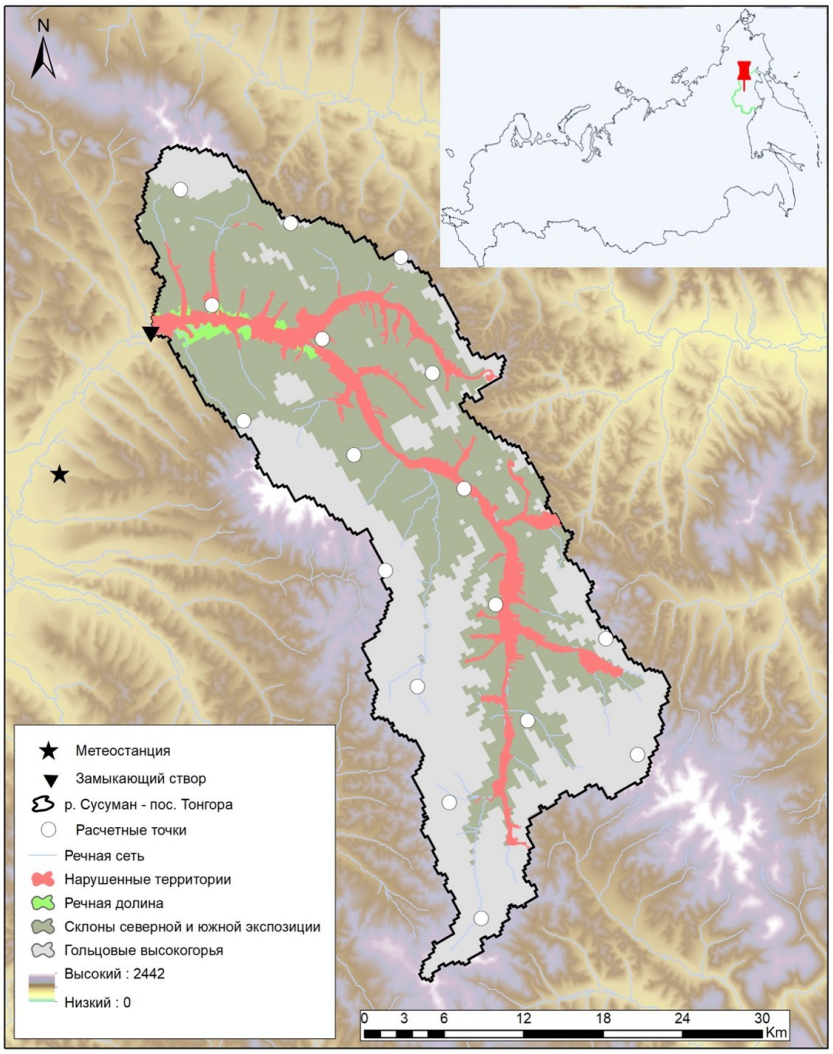


Рисунок 3. Распределение СФК в бассейне р. Сусуман
Figure 3. Runoff formation complexes in the basin of the Susuman river

В качестве входной метеорологической информации использовались суточные данные метеостанции Сусуман (655 м) (среднесуточная температура и дефицит влажности воздуха, суточное количество осадков). При моделировании учитывалось распределение метеорологических элементов с высотой: ходовой ход градиента температуры учитывает зимние температурные инверсии, характерные для региона; градиент осадков с высотой был рассчитан согласно данным об осадках на метеорологических постах, опубликованных в [Справочник…, 1966].

Непрерывное моделирование стока воды с суточным расчетным интервалом осуществлялось за период наличия метеорологической информации и рядов суточных расходов воды (1966–1987 гг.).

Результатом расчетов являются суточные гидрографы стока воды, элементы водного баланса и переменные состояния бассейнов.

В таблице 3 представлены рассчитанные и наблюденные значения элементов годового водного баланса и критерия эффективности Нэша-Сатклиффа (NS) [Nash, Sutcliffe, 1970]. Рассчитанный и наблюденный среднемноголетние слой стока для р. Сусуман за весь период расчета составили 297 и 285 мм (невязка 4,2 %). Средний рассчитанный слой осадков с учетом высотных градиентов составил 423 мм (от 301 до 564 мм), расчетная величина испарения – 124 мм. Средние и медианные значения критерия эффективности NS для р. Сусуман составляют 0,59 и 0,61 (от −0,21 до 0,90).

Таблица 4. Рассчитанные и наблюденные характеристики стока, и критерий эффективности моделирования р. Сусуман (пост р. Сусуман – пос. Тонгора)
Table 4. Simulated and observed runoff characteristics and criteria of the modelling effectiveness of Sysyman river (the Susuman River – Tongora village)

Показатель, единица измерения	Значение
Рассчитанный слой стока, мм	297
Наблюденный слой стока, мм	285
Рассчитанный слой осадков, мм	423
Рассчитанный слой испарения, мм	124
Критерий эффективности Нэша-Сатклиффа (NS): средний/медиана/максимальный/минимальный	0,59/0,61/0,90/−0,21

На рисунке 4 представлены примеры сравнения рассчитанных и наблюденных гидрографов стока на р. Сусуман для трех лет с хорошим, удовлетворительным и неудовлетворительным качеством расчета (оцениваемым по критерию NS).

Наибольшие расхождения между рассчитанными и наблюденными значениями расхода воды приходятся на периоды половодья. В некоторые годы гидрографы половодья практически совпадают, в другие наблюдается значительное занижение или завышение количества снега. Последние десятилетия Гидрометеослужба не проводит наблюдения за осадками в горных частях бассейна р. Колымы, однако даже кратковременный опыт проведения водно-балансовых исследований в бассейне р. Анмангынды (2020–2023 гг.) показывает, что метеорологические станции в значительной степени нерепрезентативны для горных территорий. Ограниченность входных метеорологических данных не позволяет повысить эффективность моделирования.

Заключение

Работа посвящена исследованию процессов формирования стока рек Магаданской области. В настоящее время гидрологический режим рек трансформируется как в результате климатических, так и антропогенных факторов, важнейшим из которых в регионе исследования является добыча золота. На первом этапе работы были решены две задачи. Для ключевого объекта – горного бассейна р. Сусуман – проведена оценка площади нарушенных территорий за период 2000–2022 гг. Общая площадь нарушенных территорий в 2022 г. составляла 82,1 км^2 или 8,8 %. Проведена параметризация и верификация распределенной гидрологической модели «Гидрограф» для бассейна р. Сусуман без учета нарушенных территорий. Период моделирования составил 1966–1987 гг. Средний критерий Нэша-Сатклиффа составил 0,59, невязка слоя стока 12 мм или 4 %. Результаты моделирования в значительной мере зависят от качества и репрезентативности входных метеорологических данных об осадках. Следующим этапом станет определение параметров нарушенных ландшафтов и

проведение численных экспериментов на основе гидрологической модели «Гидрограф» для оценки влияния россыпной золотодобычи на речной сток.

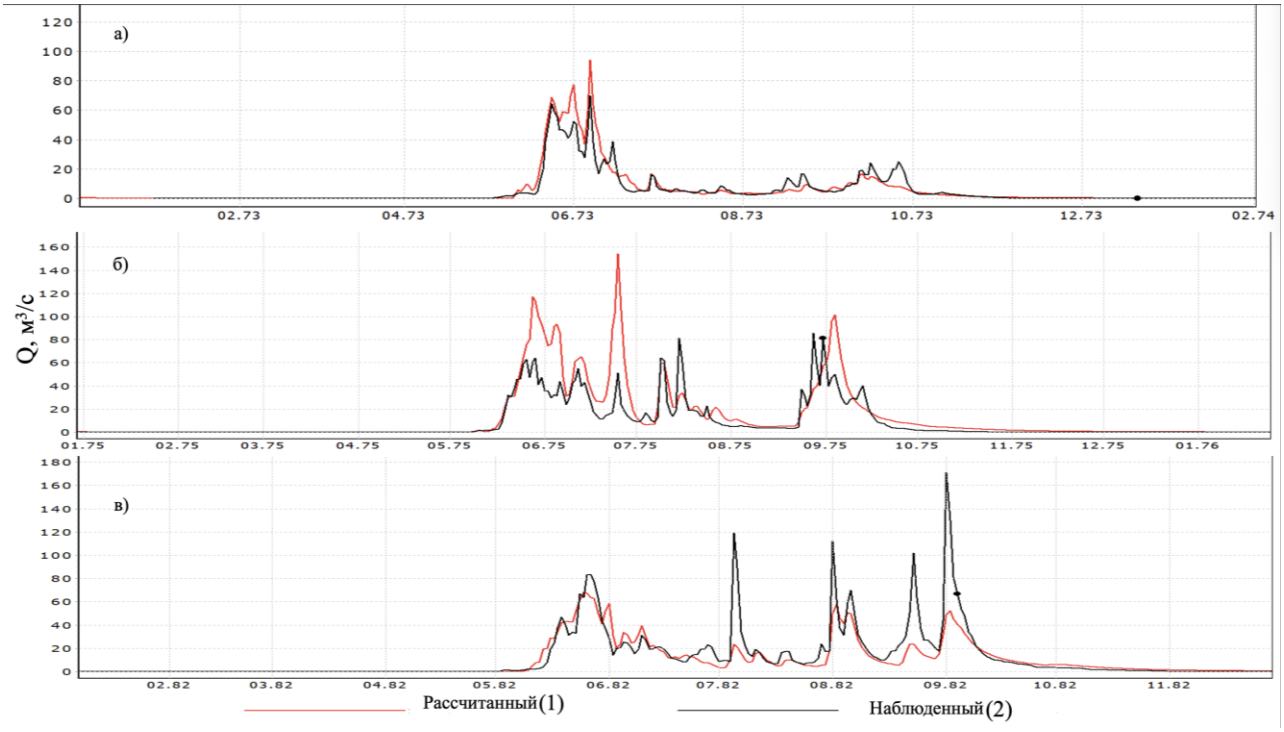


Рисунок 4. Рассчитанный (1) и наблюденный (2) гидрографы стока р. Сусуман – п. Тонгора: а) 1973 г. NS = 0,81; б) 1975 г. NS = 0,16; в) 1982 г. NS = 0,64

Figure 4. Calculated (1) and observed (2) flow hydrographs of Susuman river –Tongora village: a) 1973 г. NS = 0,81; b) 1975 г. NS = 0,16; c) 1982 г. NS = 0,64

Благодарности

Исследование проводится в рамках проекта Российского научного фонда и правительства Магаданской области № 23–17–20011 «Оценка рисков опасных явлений для инфраструктуры Магаданской области, вызванных климатически- и антропогенно-обусловленной трансформацией многолетнемерзлых пород».

Acknowledgments

The study is conducted with the support of the Russian Science Foundation and the Government of the Magadan region (project 23-17-20011).

Литература

Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А. Математическое моделирование в гидрологии. М.: Издательский центр «Академия», 2010. 298 с.

Илюшина П.Г., Шихов А.Н., Макарьева О.М. Картографирование негативного воздействия золотодобывающих предприятий на природную среду криолитозоны по спутниковым данным (на примере Магаданской области) // Исследование Земли из космоса. 2023. №1. С. 41–52.

Королев Ю.Б. Картографирование растительного покрова в связи с оценкой его гидрологической роли (на примере Верхней Колымы). Автореф.

References

Dzhamalov R.G., Frolova N.L., Kireeva M.B. Current changes in river water regime in the Don River Basin. *Water resources*, 2013, vol. 40, pp. 573–584.

Egidarev E.G., Simonov E.A. Assessment of the Environmental Effect of Placer Gold Mining in the Amur River Basin. *Water Resources*, 2015, vol. 42(7), pp. 897–908.

Gartner J.E., Bigio E.R., Cannon S.H. *Compilation of post wildfire runoff-eventdata from the western United States.* (online: USGS Open-File Report 2004–1085 http://pubs.usgs.gov/of/2004/1085).

Дис. ... канд. биол. наук. Днепропетровск, 1985. 24 с.

Макарьева О.М., Лебедева Л.С., Виноградова Т.А. Моделирование процессов формирования стока в малых горных водосборах криолитозоны (по материалам Колымской водобалансовой станции) // Криосфера Земли. 2020. Том 24, № 1. С. 43–56.

Семенова О.М., Лебедева Л.С., Волкова Н.В., Шалина Е.В. Использование спутниковых данных для исследования процессов формирования стока в бассейне р. Витимкан (зона распространения многолетней мерзлоты) // Исследование Земли из космоса. 2015. №. 3. С. 15–26. DOI: 10.7868/S0205961415030124

Справочник по климату СССР Чукотский национальный округ и Магаданская область. Вып. 34, ч. 2, М.: Гидрометеоиздат, 1966. 288 с.

Христов В.К. Страницы истории: 80 лет Сусуманскому ГОКу, 65 лет Сусуманскому району. Магадан: Охотник, 2018. 279 с.

Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Под ред. Катцов В.М. СПб.: Наукоемкие технологии. 2022. 124 с.

Шпикерман В.И., Васькин А.Ф., Желебогло О.В. Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1:1 000 000. Третье поколение. Серия Верхояно-Колымская. Лист P-55 (Сусуман). Геологическая карта, составлена: ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2016.

Dzhamalov R.G., Frolova N.L., Kireeva M.B. Current changes in river water regime in the Don River Basin // Water resources. 2013. Vol. 40. P. 573–584.

Egidarev E.G., Simonov E.A. Assessment of the Environmental Effect of Placer Gold Mining in the Amur River Basin // Water Resources. 2015. Vol. 42(7). P. 897–908.

Gartner J.E., Bigio E.R., Cannon S.H. Compilation of post wildfire runoff-eventdata from the western United States. (online: USGS Open-File Report 2004–1085 http://pubs.usgs.gov/of/2004/1085).

Jarsjö J., Chalov S.R., Pietroń J., Alekseenko A.V., Thorslund J. Patterns of soil contamination, erosion and river loading of metals in a gold mining region of northern Mongolia // Reg. Environ. Change. 2017. Vol. 17. P. 1991–2005.

Iliushina P.G., Shikhov A.N., Makarieva O.M. Mapping of the negative impact of gold mining on the natural environment of permafrost zone from satellite data (case of Magadan region). *Issledovanie Zemli iz kosmosa [Earth Observation and Remote Sensing],* 2023, no. 1, pp. 41–52 (In Russian).

Jarsjö J., Chalov S.R., Pietroń J., Alekseenko A.V., Thorslund J. Patterns of soil contamination, erosion and river loading of metals in a gold mining region of northern Mongolia. *Reg. Environ. Change*, 2017, vol. 17, pp. 1991–2005.

Khristov, V.K. *History Pages. 80 Years of Susuman GOK. 65 Years of Susumansky District*. Magadan, Russia: Okhotnik publisher, 2018. 280 p. (In Russian).

Korolev Yu.B. *Kartografirovanie rastitelnogo pokrova v svyazi s ocenkoj ego gidrologicheskoj roli (na primere Verhnej Kolymy). [Mapping of vegetation cover in connection with the assessment of its hydrological role (on the example of the Upper Kolyma)]*, abstract. Diss. ... Cand. Biol. Sciences'. Dnepropetrovsk, 1985. 24 p. (In Russian).

Lawrence S., Grove J., Davies P., Turnbull J., Rutherfurd I., Macklin M. Historical dredge mining as a significant anthropomorphic agent in river systems: A case study from south-eastern Australia. *The Holocene*, 2021, vol. 31, no. 7, pp. 1158–1174.

Makarieva O., Nesterova N., Lebedeva L., Sushansky S. *Water-balance and hydrology database for a mountainous permafrost watershed in the up-streams of the Kolyma River, Russia – the Kolyma Water-Balance Station*, 1948–1997. PANGAEA. 2017. DOI:10.1594/PANGAEA.881731 (дата обращения: 20.12.2023).

Makarieva O.M., Lebedeva L.S., Vinogradova T.A. Modeling of runoff formation processes in small mountain catchments of the cryolithozone (based on materials from the Kolyma Water Balance Station). *The Cryosphere of the Earth*, 2020, vol. 24, no. 1. pp. 43–56. (In Russian).

Moody J.A., Martin D.A., Haire S.L., Kinner D.A. Linking runoff response to burn severity after wildfire. *Hydrological Processes*, 2008, vol. 22, pp. 2063–2074.

Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. River flow forecasting through conceptual mgdels, part 1-a discussion of principles. *J. Hydrol.,* 1970, vol 10, pp. 282–290.

Lawrence S., Grove J., Davies P., Turnbull J., Rutherfurd I., Macklin M. Historical dredge mining as a significant anthropomorphic agent in river systems: A case study from south-eastern Australia // The Holocene. 2021. Vol. 31. No. 7. P. 1158–1174.

Makarieva O., Nesterova N., Lebedeva L., Sushansky S. Water-balance and hydrology database for a mountainous permafrost watershed in the up-streams of the Kolyma River, Russia - the Kolyma Water-Balance Station, 1948-1997. PANGAEA. 2017. DOI:10.1594/PANGAEA.881731 (дата обращения: 20.12.2023).

Moody J.A., Martin D.A., Haire S.L., Kinner D.A. Linking runoff response to burn severity after wildfire // Hydrological Processes. 2008. Vol. 22. P. 2063–2074.

Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. River flow forecasting through conceptual mgdels, part 1-a discussion of principles // J. Hydrol. 1970. Vol. 10. P. 282–290.

Neary D.G., Gottfried G.J. Fires and floods: post-fire watershed responses. In: Viegas V.R. (Ed.), Forest Fire Research & Wildland Fire Safety. Millpress, Rotterdam, 2002. P. 1–9.

Pausas J.G., Llovet J., Rodrigo A., Vallejo R. Are wildfires a disaster in the Mediterranean basin? // International Journal of Wildland Fire. 2008. Vol. 17. P. 713–723.

Shikhov A., Ilyushina P., Makarieva O., Zemlianskova A., Mozgina M. Satellite-Based Mapping of Gold-Mining-Related Land-Cover Changes in the Magadan Region, Northeast Russia // Remote Sensing. 2023. Vol. 15(14), P. 3564. DOI:10.3390/rs15143564.

Zemtsov S.P., Baburin V.L., Koltermann K.P., Krylenko I.N., Yumina N.M., Litvinov V.Yu. Social risk and vulnerability assessment of hazardous hydrological phenomena in Russia. *Geography, environment, sustainability*. 2014; 7(4). P. 95–117. DOI:10.24057/2071-9388-2014-7-4-95-117.

Neary D.G., Gottfried G.J. Fires and floods: post-fire watershed responses. In: Viegas V.R. (Ed.), *Forest Fire Research & Wildland Fire Safety*. Millpress, Rotterdam, 2002, pp. 1–9.

Pausas J.G., Llovet J., Rodrigo A., Vallejo R. Are wildfires a disaster in the Med-iterranean basin? *International Journal of Wildland Fire*, 2008, vol. 17, pp. 713–723.

Semenova O.M., Lebedeva L.S., Volkova N.V., Shalina E.V. Using satellite data to study the processes of runoff formation in the river basin Vitimkan (permafrost distribution zone). *Issledovanie Zemli iz kosmosa [Exploration of the Earth from space]*, 2015, no. 3, pp. 5–15. DOI: 10.7868/S0205961415030124 (In Russian).

Shikhov A., Ilyushina P., Makarieva O., Zemlianskova A., Mozgina M. Satellite-Based Mapping of Gold-Mining-Related Land-Cover Changes in the Magadan Region, Northeast Russia. *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15(14), 3564. DOI:10.3390/rs15143564.

Shpikerman V.I., Vaskin A.F., Zheleboglo O.V. *Russia 1:1000000 Scale Geological Maps (Third Generation). Verkhoyano-Kolyma series. Sheet Index P-55 (Susuman).* Publ. Russian Geological Research Institute, 2016. (In Russian).

Spravochnik po klimatu USSR Chukotskii natsionalnyi okrug i Magadanskaia oblast [USSR Climate Handbook Chukotsky National District and Magadan Region], vol. 34(2), Moscow, Gidrometeoizdat Publisher, 1966, 288 p. (In Russian).

Tretii ocenochnyi doklad ob izmeneniyah klimata i ih posledstviyah na territorii Rossiiskoi Federacii. [The third assessment report on climate change and its consequences in Russian Federation. General summary]. Ed. Kattsov V.M. St. Petersburg: High-tech technologies. 2022. 124 p. (In Russian).

Vinogradov Yu.B., Vinogradova T.A. *Mathematical modeling in hydrology*. M., Publ. Center Academy, 2010. 298 p. (In Russian).

Zemtsov S.P., Baburin V.L., Koltermann K.P., Krylenko I.N., Yumina N.M., Litvinov V.Yu. Social risk and vulnerability assessment of hazardous hydrological phenomena in Russia. *Geography, environment, sustainability,* 2014, vol. 7(4), pp. 95–117. DOI:10.24057/2071-9388-2014-7-4-95-117.

УДК 556.044, 556.12 DOI: 10.34753/HS.2023.5.3.244

ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА РЕК КРИОЛИТОЗОНЫ В УСЛОВИЯХ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В РЕЧНЫХ ДОЛИНАХ (НА ПРИМЕРЕ ДОБЫЧИ ЗОЛОТА В БАССЕЙНЕ Р. СУСУМАН, МАГАДАНСКАЯ ОБЛАСТЬ)

П.А. Никитина[1], А.Н. Шихов[2], О.М. Макарьева[3,1], А.А. Землянскова[3,1], Н.В. Нестерова[1,4]

[1]Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия; [2]Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия; [3]Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан, Россия; [4]Государственный гидрологический институт, г. Санкт-Петербург, Россия

nikitinapolina243@gmail.com

Аннотация. Добыча золота на россыпных месторождениях Восточной Сибири и Дальнего Востока играет важную роль в экономике этих регионов. Магаданская область в данной отрасли занимает первое место в России. Однако увеличение объемов добычи сопровождается негативными последствиями для природной среды, включая изменение русел рек, уничтожение растительного покрова, увеличение мутности воды и др. Эти изменения могут стать источником опасных гидрометеорологических явлений, таких как паводки. Настоящее исследование посвящено оценке воздействия изменения климата и антропогенных факторов на формирование стока рек в Сусуманском районе, одном из центров золотодобычи в Магаданской области, с помощью математической модели «Гидрограф». Объектом исследования выбран бассейн реки Сусуман, где добыча золота и гидрометеорологические наблюдения начались в 30-х гг. прошлого века. По спутниковым данным Sentinel-2 доля нарушенных земель в

THE PROCESSES OF RIVER RUNOFF FORMATION IN THE PERMAFROST ZONE PERMAFROST UNDER MINING ACTIVITY IN RIVER VALLEYS (ON THE EXAMPLE OF GOLD MINING IN THE SUSUMAN RIVER BASIN, THE MAGADAN REGION)

Polina A. Nikitina[1], Andrey N. Shikhov[2], Olga M. Makarieva[3,1], Anastasiia A. Zemlianskova[3,1], Nataliia V. Nesterova[1,4]

[1]Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia; [2]Perm State University, Perm, Russia;[3]Northeastern State University, Magadan, Russia;[4]State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia

nikitinapolina243@gmail.com

Abstract. Gold mining in placer deposits in Eastern Siberia and the Far East plays an important role in the economy of these regions. The Magadan region ranks first in Russia, in this industry. However, an increase in production volumes is accompanied by negative impact onthe natural environment, including changes in riverbeds, destruction of vegetation, the increased water turbidity, etc. These changes can become a source of dangerous hydrometeorological phenomena such as floods. This study is devoted to assessing the impact of climate change and technogenic factors on the formation of river flow in the Susuman district, one of the gold mining centers in the Magadan region, using the Hydrograph mathematical model. The object of study was the Susuman River basin, where gold mining and hydrometeorological observations began in the 30s of the last century. According to Sentinel-2 satellite data, the proportion of mining-impacted lands in the Susuman river basin (up to the village of Tongora) is estimated at 8.8 % of the total area of the basin, including 3 % completely devoid of

Nikitina P. A., Shikhov A. N., Makarieva O. M., Zemlianskova A. A., Nesterova N. V. The processes of river runoff formation in the permafrost zone permafrost under mining activity in river valleys (on the example of gold mining in the Susuman river basin, the Magadan region). *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2023, vol. 5, iss. 3, pp. 244–255. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2023.5.3.244.

бассейне р. Сусуман (до п. Тонгора) оценена в 8,8 % от общей площади бассейна, в том числе 3 % полностью лишено растительности. На первом этапе исследований проведено моделирование процессов формирования стока в бассейне р. Сусуман за период 1966–1987 гг. без учета нарушенных территорий. Средний критерий Нэша-Сатклиффа за период моделирования составил 0,59, невязка годового слоя стока – 12 мм или 4 %. Результаты моделирования в значительной мере зависят от качества и репрезентативности входных метеорологических данных об осадках. Следующим этапом станет разработка параметров нарушенных ландшафтов и численных экспериментов по их верификации на основе гидрологической модели.

Ключевые слова: добыча золота; речной сток; нарушение земель; бассейн р. Сусуман; гидрологическая модель «Гидрограф».

vegetation. At the first stage of research, modeling of runoff formation processes in the Susuman river basin was carried out for the period 1966-1987 without taking into account mining-impacted areas. The average Nash-Sutcliffe criterion for the modeling period was 0.59 of the annual runoff layer is 12 mm or 4 %. Modeling results are highly dependent on the quality and representativeness of the input meteorological precipitation data. The next stage will be the development of parameters of mining-impacted landscapes and numerical experiments to verify them based on a hydrological model.

Keywords: gold mining; river runoff; land disturbance; the Susuman River basin; «Hydrograph» hydrological model.

Введение

Важным сектором экономики Восточной Сибири и Дальнего Востока является добыча золота на рудных и россыпных месторождениях. История развития отрасли в Магаданской области берет свое начало с 30-х гг. прошлого столетия. Рост объемов добычи россыпного золота сопровождается увеличением негативного воздействия на природную среду, в частности приводит к изменению морфологических и гидрографических характеристик водосборов рек [Lawrence et al., 2021]. Отсутствие системы мониторинга воздействия золотодобычи на окружающую среду в России не позволяет оценить масштабы экологических и экономических проблем, вызываемых такой деятельностью. Инвентаризация земель, подвергшихся воздействию, завершена только для бассейна р. Амур. На основе анализа данных дистанционного зондирования Земли показано, что площадь нарушенных земель составляет около 7 % площади бассейнов реки Амур (4200 км^2), но оценка их влияния на сток не проводилась [Egidarev, Simonov, 2015]. В Магаданской области площадь земель, нарушенных в результате добычи золота и полностью лишенных растительности составляет более 720 км^2, в том числе 260 км^2 − прирост их площади за последние 4–6 лет [Shikhov et al., 2023].

Разработка месторождений золота в Магаданской области осуществляется тремя методами, которые по-разному воздействуют на окружающую среду: дражный, карьерный и открытая разработка. Дражный метод применяется для добычи рассыпного золота, когда специальный механизм (драга), расположенный в русле реки, черпает породу, которой сложена долина и пойма реки, с целью дальнейшей переработки. Для эффективной работы драги необходим определенный уровень воды в дражном котловане, который регулируется благодаря искусственным плотинам и шлюзам. Вследствие разработки образуются галечно-эфельные отвалы, а промытый песок оседает на дно образовавшегося котлована. Основной особенностью карьерной разработки являются вскрышные работы, которые могут выполняться несколькими способами: а) с использованием взрывчатки; б) гидравлической оттайкой;

в) рыхлением. При применении гидравлической оттайки изменяется мощность многолетнемерзлых пород, а также увеличивается интенсивность глубинной и боковой эрозии. Рыхление и массовые взрывы приводят к уменьшению альбедо, что также может приводить к увеличению сезонно-талого слоя. Открытая добыча подразумевает повторную переработку ранее использованных массивов пород.

Таким образом, на участках речных долин и в руслах рек формируется сложная система искусственных водоемов (рисунок 1). Многочисленные пруды-отстойники и русловая сеть антропогенного происхождения подвержены процессам заиливания и заболачивания. Образуются дамбы, которые в периоды интенсивных осадков могут прорываться и приводить к формированию катастрофических паводков. Прорывные паводки и склоновый сток транспортируют в реки большой объем загрязняющих веществ. Наиболее характерным для рек золотодобывающих районов является загрязнение взвешенными веществами и тяжелыми металлами [Jarsjö et al., 2017; Илюшина и др., 2023]. Распространение многолетнемерзлых пород и антропогенные изменения геокриологического режима приводят к тому, что восстановление ландшафтов на нарушенных участках занимает продолжительное время. На основе данных космических снимков выявлено, что в пределах Тенькинского, Сусуманского и Ягоднинского районов Магаданской области, около 2 % площади территории нарушены в результате золотодобычи, из них только на 10 % наблюдаются процессы восстановления растительного покрова [Илюшина и др., 2023].

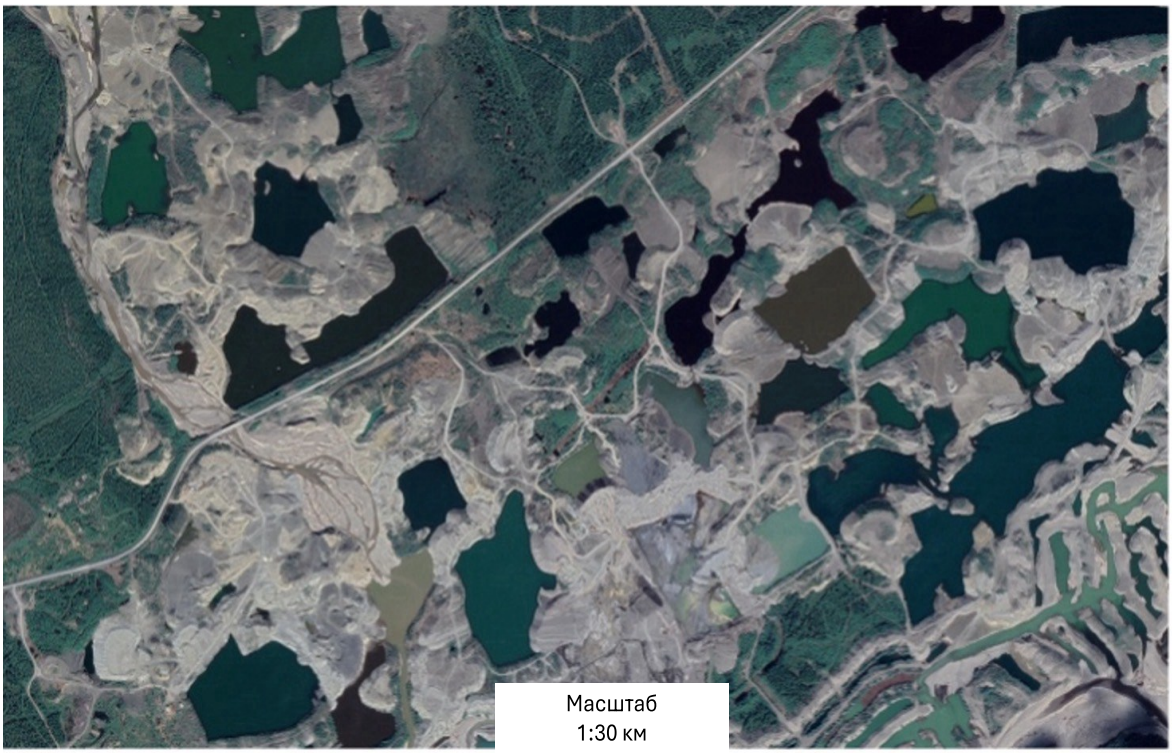


Рисунок 1. Спутниковый снимок нарушенных ландшафтов в долине р. Сусуман (Сусуманский район Магаданской области) с сервиса Google Earth

Figure 1. Landscapes impacted by gold mining in the Berelekh river valley (Susumansky district of Magadan region) (satellite image from Google Earth service)

Магаданская область относится к региону повышенного экономического риска вследствие воздействия опасных гидрометеорологических явлений [Zemtsov et al., 2014]. Расчеты производились на основе двух формул расчета риска «Мирового индекса риска» (WRI) и «Региональный Российский индекс риска» (RRIR). Полученные значения WRI в работе [Zemtsov et al., 2014] сравнимы с территориями Краснодарского края, для которого характерны

регулярные наводнения, сели и нестабильная метеорологическая обстановка. Оба региона определены в категорию очень высокого риска воздействия. Оценка риска опасных гидрометеорологических явлений по методу RRIR, определила Магаданскую область как территорию высокого риска, и она уступает Краснодарскому краю в рассчитанных значениях RRIR. С повышенными экономическим и социальным рисками также связан нестационарный климат Дальнего Востока. Согласно [Третий оценочный …, 2022], в регионе ожидается увеличение водности рек, что повышает риски затопления. К 2050 г. прогнозируют увеличение экстремумов суточного количества осадков, повышение среднегодовой температуры воздуха на 5 °С и деградацию многолетней мерзлоты. Перечисленные происходящие процессы изменения природной среды способствуют формированию экстремальных паводков. Обобщая приведенные факты, можно сказать, что на сток рек района исследования влияют климатические и антропогенные факторы.

В литературных источниках практически нет информации о количественном изменении речного стока вследствие горнодобывающей деятельности. Схожим процессом, влияющим на подстилающую поверхность путем удаления растительного покрова, является лесной пожар. На территориях, лишенных растительного покрова часто максимальные расходы воды с малых водосборов в разы, превышают максимальные величины, наблюдаемые в ненарушенных условиях [Gartner et al., 2004; Moody et al., 2008]. Также нарушенные территории могут способствовать формированию катастрофических паводков [Neary, Gottfried, 2002; Pausas et al., 2008]. В работе [Семенова и др., 2015] для водосбора, расположенного в зоне распространения многолетней мерзлоты, показано увеличение объема ливневых паводков после пожара на 30–40 %.

По аналогии с территориями, лишенными растительности в результате лесных пожаров, можно предположить наличие эффекта комплексирования климатических и антропогенных (горнодобывающая деятельность) факторов формирования паводков на территории Магаданской области.

Одним из центров золотодобычи Магаданской области является Сусуманский район. В г. Сусумане в последние годы катастрофические наводнения наблюдались в 2016 и 2019 гг. Для предотвращения паводков в г. Сусуман в 2016 г.[1] были проведены мероприятия по берегоукреплению. Однако, они не помогли избежать наводнения в этот и последующие годы. Из средств массовой информации, достоверно известно о трех случаях, нанесших значительный ущерб: 13–14 июня 1995 г.[2], 27–28 августа 2016 г.[3], 6–7 августа 2019 г.[4] В то же время в регионе отсутствует система прогнозирования опасных гидрологических явлений ввиду редкой гидрометеорологической сети наблюдений. Например, в бассейне р. Сусуман с 1987 г. не измеряются расходы воды, хотя ранее здесь действовали гидрологические посты.

Целью данного исследования является количественная оценка вклада климатического изменения и антропогенного воздействия (нарушение ландшафтов речных долин и деформация русел) в формирование опасных гидрометеорологических явлений на реках Магаданской области, в том числе, на основе методов моделирования. В качестве объекта исследования принят бассейн р. Сусуман, на территории которого добыча золота и гидрометеорологические наблюдения были начаты в 30-х гг. прошлого века. На первом этапе решены следующие задачи: 1) на основе космических снимков проведена оценка площади

[1] Укрепление дамбы [Эл. ресурс] URL: https://www.49gov.ru/press/press_releases/?id_4=17630&ysclid=lniwydvia5496350774, дата обращения на сайт 10.09.2023 г.
[2] Наводнение 1995 года [Эл. ресурс] URL: https://furyrec.livejournal.com/15078.html?ysclid=lnsvgph1kj217793867, дата обращения 10.09.2023 года
[3] Наводнение 2016 года [Эл. ресурс] URL: https://ria.ru/20160828/1475464820.html?ysclid=lnsvhat67z163375361, дата обращения 10.09.2023 г.
[4] Наводнение 2019 года [Эл. ресурс] URL: https://vesmatoday.net/news/post/8921-v-susumanskom-rayone-?ysclid=lnsvhrgsky303296341, дата обращения 10.09. 2023 г.

нарушенных земель в бассейне р. Сусуман; 2) проведена параметризация и верификация гидрологической модели для бассейна р. Сусуман.

Объект исследования

Бассейн р. Сусуман расположен в Сусуманском районе Магаданской области. Река является левым притоком р. Берелёх, которая является притоком второго порядка для р. Колымы. Относится к верховьям р. Колымы и берет свое начало в нескольких километрах к югу от горы Морджот – обособленного массива, входящего в хребет Черского [Шпикерман и др., 2016]. Площадь бассейна в створе Тонгора составляет 932 км^2, его характеристики представлены в таблице 1. Река протекает по территории распространения сплошной многолетней мерзлоты на высотах 691–1968 м, что относится к зоне подгольцовых редколесий. Также на таких высотах выделяются обнаженные горные породы и скалистые тундровые участки [Королев, 1985].

Климат территории резко континентальный, с длительным (7 и более месяцев) холодным периодом года, с абсолютным минимумом −60,6 °С в январе. Тёплый период года длится с третьей декады мая по сентябрь. Максимальные температуры наблюдаются в июле, абсолютный максимум составил 35 °С. Средняя многолетняя температура (1937–2023 гг.) по данным метеостанции Сусуман (655 м), составляет −12,5 °С, средняя многолетняя сумма осадков – 312 мм.

Гидрологический режим реки относится к дальневосточному типу и отличается высокими дождевыми паводками, которые соединяются с весенним половодьем, а иногда и превышают его по максимальным значениям расхода воды. Летом река переходит в непродолжительную фазу межени, а зимой перемерзает.

Таблицы 1. Характеристики водосбора р. Сусуман (пост р. Сусуман – пос. Тонгора**)**
Table 1. Characteristics of Sysyman river basin (the Susuman river – Tongora village)

Показатель, единица измерения	Значение
Код поста	01076
Период наблюдений за расходом воды	1941–1987
Площадь водосбора, км^2	932
Максимальная/минимальная/средняя высота водосбора, м	1968/691/1001
Средневзвешенный уклон, º	5,53
Средний/максимальный суточный расход воды за период наблюдений, м3/с	8,42/346

Материалы и методы

Оценка площади нарушенных земель в бассейне р. Сусуман по спутниковым данным

Использование спутниковых снимков миссии Sentinel-2 с пространственным разрешением 10 м и повторяемостью съемки каждые 2–3 дня позволяет объективно оценить площади нарушенных при золотодобыче земель и их динамику, несмотря на относительно невысокую повторяемость безоблачных дней в летний сезон и короткую продолжительность вегетационного периода. В рамках настоящей работы по снимкам Sentinel-2 были решены следующие задачи:

– оценена площадь земель, нарушенных при золотодобыче и полностью лишенных растительности (в полуавтоматическом режиме на основе нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI).

– оценена площадь всех земель с признаками нарушения золотодобычей на основе текстурных признаков (методом визуального дешифрирования).

Методика оценки площади нарушенных земель по разновременным снимкам, полученным в вегетационный период (в июле-августе), детально описана в работе [Shikhov et al., 2023].

Моделирование процессов формирования стока с учетом нарушенных территорий

Для исследования процесса формирования стока используется распределенная, физически обоснованная гидрологическая модель

«Гидрограф» [Виноградов, Виноградова, 2010]. Модель «Гидрограф» применяется в масштабе от единичной почвенной колонки до бассейнов крупных рек без изменения структуры и набора параметров для идентичных ландшафтов. Результатами моделирования является сток воды в замыкающем створе, водный баланс, распределенные переменные состояния ландшафтов – характеристики снежного покрова, температура и влажность почвы на разных горизонтах, глубина протаивания и промерзания и другие. В качестве входной информации модель использует данные о температуре и дефиците влажности воздуха и количестве осадков суточного или часового разрешения. Упрощенная входная информация позволяет применять модель на малоизученных бассейнах.

Параметризация модели осуществляется путем выделения однородных ландшафтов по характеристикам почвенно-растительного покрова, влияющих на формирование стока. Благодаря разделению водосбора на стокоформирующие комплексы (СФК), модель позволяет учитывать изменения в ландшафте, такие как лесные пожары [Семенова и др., 2015], вырубка деревьев и урбанизация, которые могут быть описаны с использованием динамического набора параметров, что делает ее пригодной для численных экспериментов в целях исследования процессов формирования стока. Модель неоднократно применялась для расчетов характеристик стока рек в условиях горной криолитозоны Северо-Востока России [Макарьева и др., 2020].

В качестве входной гидрометеорологической информации используется суточные данные метеостанции Сусуман (24790) и суточные значения расхода воды гидропоста р. Сусуман – пос. Тонгора (01076).

Таблица 2. Значения параметров нарушенного ландшафта для бассейна р. Сусуман
Table 2. Values of the parameters of the disturbed landscape for Susuman river basin

Показатель, единца измерения	Значение
Общая площадь нарушенных земель, км^2/%	82,1/8,8
Площадь нарушенных земель, лишенных растительности, км^2/%	27,0/3,0
Прирост площади нарушенных земель за 2016–2022 гг., км^2/%	10,3/1,1
Площадь участков нарушений с восстанавливающейся растительностью, км^2/%	43,8/4,7
Площадь буферных зон, км^2	170,2
Площадь нарушенных земель в буферной зоне, км^2/%	60,1/35,3

Результаты

Оценка площади нарушенных земель в бассейне р. Сусуман по спутниковым данным

Добыча золота в бассейне р. Сусуман началась более 80 лет назад и продолжается в настоящее время [Khristov, 2018]. В целом, в бассейне р. Сусуман, до замыкающего створа пос. Тонгора, площадь нарушенных территорий составляет 82,1 км^2 (8,83 %) из них 10,3 км^2 – прирост с 2016 г (рисунок 2а, таблица 2). При этом наиболее существенное воздействие золотодобычи на наземные экосистемы связано с добычей россыпного золота в речных долинах. Для оценки степени преобразованности речных долин построена буферная зона вдоль русел рек общей шириной 1000 м, ее площадь на территории бассейна составляет 170 км^2. Учитывая как нынешние, так и исторические горные выработки, на которых растительность уже восстановилась, а также искусственные водоемы, более 35 % площади долинных ландшафтов в бассейне р. Сусуман преобразованы золотодобычей (рисунок 2б). Такое серьезное воздействие на поймы приводит к существенному увеличению мутности воды [Илюшина и др., 2023].

Наряду с деградацией земель в исследовании оценивалось восстановление растительности на исторических участках золотодобычи. Анализ значений NDVI по снимкам Landsat, полученным в 2000, 2009 и 2021 гг., показал значительное восстановление растительности в районах, пострадавших от добычи золота до 2000 г. Участки нарушений возрастом от 20–30 лет и более уже невозможно

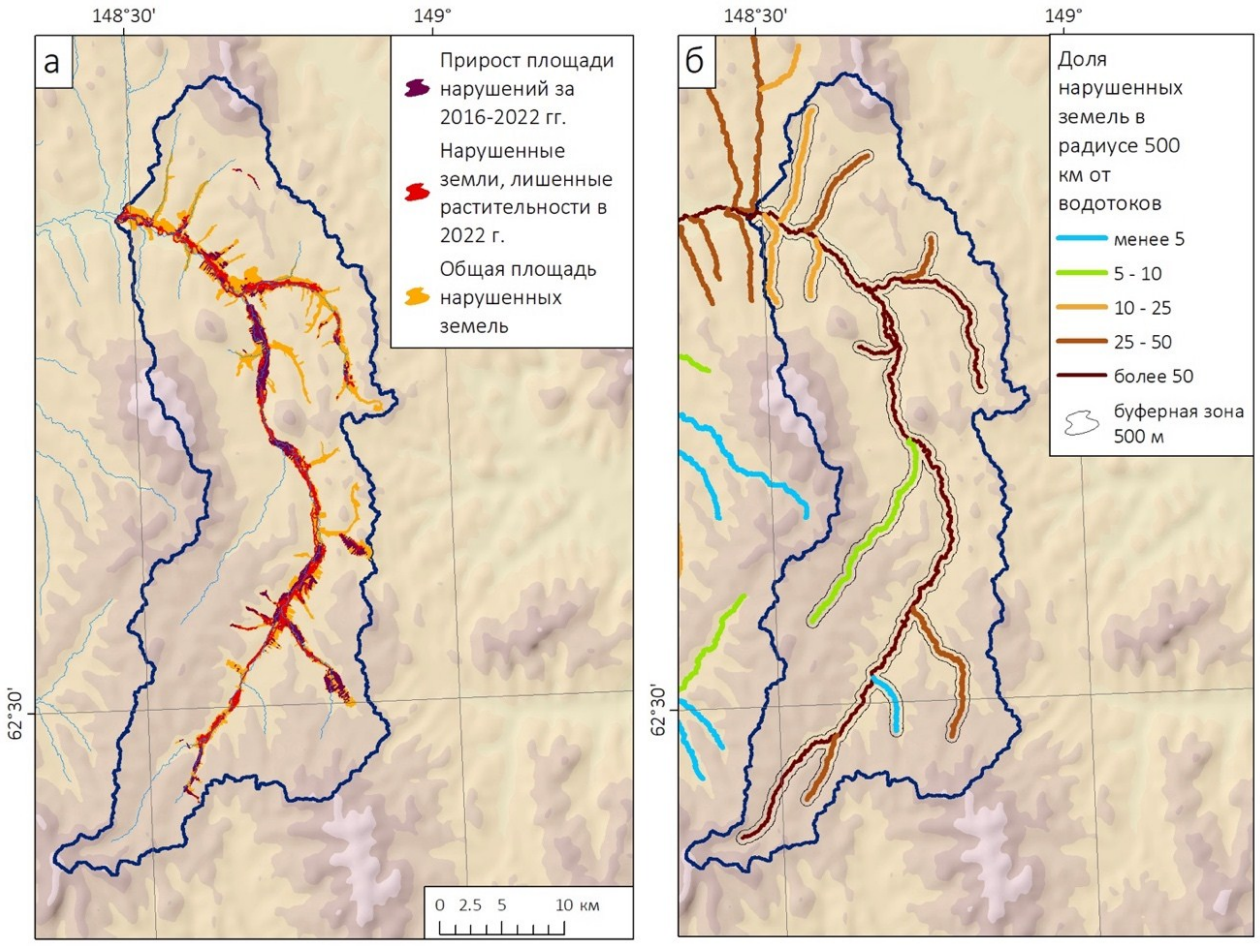


Рисунок 2. Пространственное распределение нарушенных земель в долине р. Сусуман по снимкам Sentinel-2: а) Нарушенные территории для всего бассейна реки; б) Распределение долей нарушенных территорий в буферных зонах

Figure 2. Spatial distribution of mining-impacted areas in the Sysyman river valley according to Sentinel-2 images: a) Disturbed territories for the entire river basin; b) Distribution of the shares of disturbed territories in buffer zones

выявить на основе разности NDVI. Основным отличительным признаком нарушенных земель, на которых уже восстановился растительный покров, является характерная текстура изображения, связанная с густой сетью искусственных водоемов и проток, а также сформированных драгой элементов рельефа. Такие участки хорошо различимы на снимках летнего периода, и они были выделены в интерактивном режиме (оцифрованы вручную). Их общая площадь составила 43,8 км^2, или 4,7 % от всей площади бассейна р. Сусуман в замыкающем створе пос. Тонгора. (таблица 2).

Параметризация и верификация гидрологической модели в бассейне р. Сусуман

На первом этапе исследования была проведена оценка применимости модели «Гидрограф» для расчетов характеристик стока в исследуемом бассейне. Моделирование процессов формирования стока проводилось без учета нарушенных территорий, а для параметризации бассейна р. Сусуман использовалась ранее опубликованная схема параметров модели для бассейнов верховьев р. Колымы [Макарьева и др., 2020], разработанная на основе анализа материалов Колымской водно-балансовой станции (1948–1997 гг.) [Makarieva et al., 2017]. Согласно предложенной схеме, в пределах бассейнов было выделено четыре стокоформирующих комплекса: гольцы, склоны северной экспозиции, склоны южной экспозиции и речная долина (таблица 2, рисунок 3).

Таблица 3. Распределение СФК исследуемого бассейна
Table 3. Distribution of the RFCs of the studied basins

Тип СФК	Отметка высот/средняя высота, м	Площадь бассейна р. Сусуман, км^2 (%)
Гольцы	> 1000	415 (44,6)
Склоны	700–1000	486 (52,2)
Речная долина	<700	2,6 (0,3)
Количество РТ	–	17

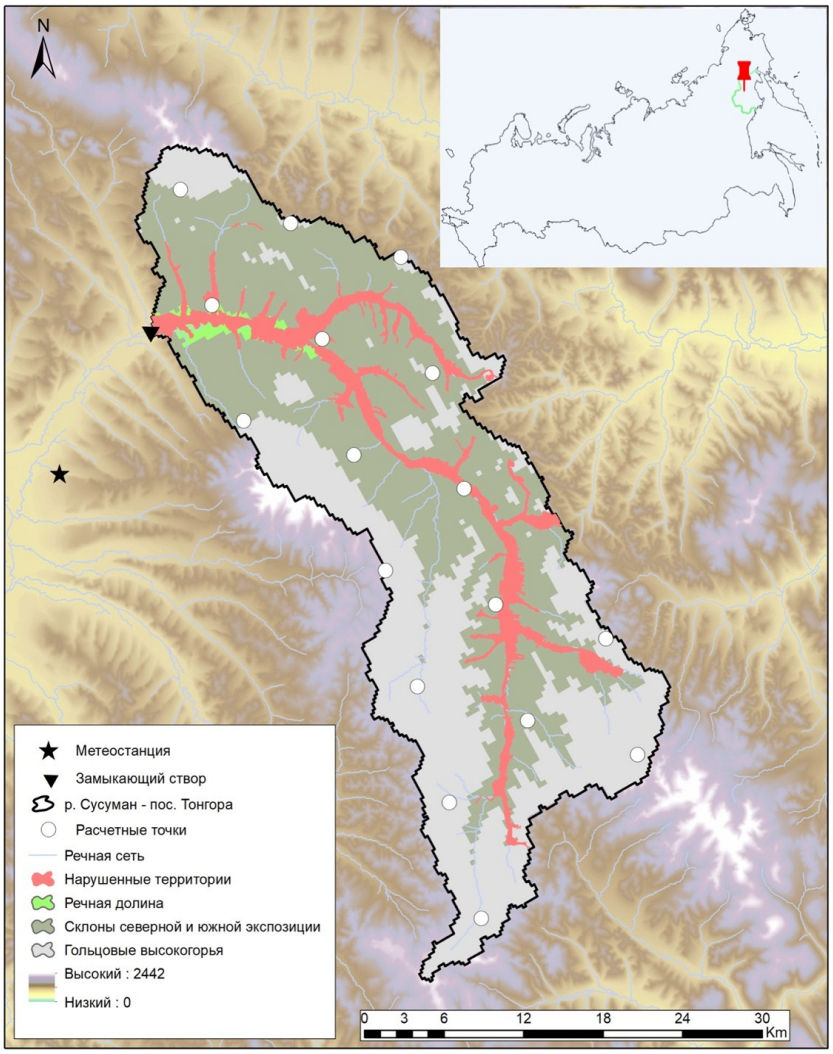


Рисунок 3. Распределение СФК в бассейне р. Сусуман
Figure 3. Runoff formation complexes in the basin of the Susuman river

В качестве входной метеорологической информации использовались суточные данные метеостанции Сусуман (655 м) (среднесуточная температура и дефицит влажности воздуха, суточное количество осадков). При моделировании учитывалось распределение метеорологических элементов с высотой: ходовой ход градиента температуры учитывает зимние температурные инверсии, характерные для региона; градиент осадков с высотой был рассчитан согласно данным об осадках на метеорологических постах, опубликованных в [Справочник…, 1966].

Непрерывное моделирование стока воды с суточным расчетным интервалом осуществлялось за период наличия метеорологической информации и рядов суточных расходов воды (1966–1987 гг.).

Результатом расчетов являются суточные гидрографы стока воды, элементы водного баланса и переменные состояния бассейнов.

В таблице 3 представлены рассчитанные и наблюденные значения элементов годового водного баланса и критерия эффективности Нэша-Сатклиффа (NS) [Nash, Sutcliffe, 1970]. Рассчитанный и наблюденный среднемноголетние слой стока для р. Сусуман за весь период расчета составили 297 и 285 мм (невязка 4,2 %). Средний рассчитанный слой осадков с учетом высотных градиентов составил 423 мм (от 301 до 564 мм), расчетная величина испарения – 124 мм. Средние и медианные значения критерия эффективности NS для р. Сусуман составляют 0,59 и 0,61 (от −0,21 до 0,90).

Таблица 4. Рассчитанные и наблюденные характеристики стока, и критерий эффективности моделирования р. Сусуман (пост р. Сусуман – пос. Тонгора)
Table 4. Simulated and observed runoff characteristics and criteria of the modelling effectiveness of Sysyman river (the Susuman River – Tongora village)

Показатель, единица измерения	Значение
Рассчитанный слой стока, мм	297
Наблюденный слой стока, мм	285
Рассчитанный слой осадков, мм	423
Рассчитанный слой испарения, мм	124
Критерий эффективности Нэша-Сатклиффа (NS): средний/медиана/максимальный/минимальный	0,59/0,61/0,90/−0,21

На рисунке 4 представлены примеры сравнения рассчитанных и наблюденных гидрографов стока на р. Сусуман для трех лет с хорошим, удовлетворительным и неудовлетворительным качеством расчета (оцениваемым по критерию NS).

Наибольшие расхождения между рассчитанными и наблюденными значениями расхода воды приходятся на периоды половодья. В некоторые годы гидрографы половодья практически совпадают, в другие наблюдается значительное занижение или завышение количества снега. Последние десятилетия Гидрометеослужба не проводит наблюдения за осадками в горных частях бассейна р. Колымы, однако даже кратковременный опыт проведения водно-балансовых исследований в бассейне р. Анмангынды (2020–2023 гг.) показывает, что метеорологические станции в значительной степени нерепрезентативны для горных территорий. Ограниченность входных метеорологических данных не позволяет повысить эффективность моделирования.

Заключение

Работа посвящена исследованию процессов формирования стока рек Магаданской области. В настоящее время гидрологический режим рек трансформируется как в результате климатических, так и антропогенных факторов, важнейшим из которых в регионе исследования является добыча золота. На первом этапе работы были решены две задачи. Для ключевого объекта – горного бассейна р. Сусуман – проведена оценка площади нарушенных территорий за период 2000–2022 гг. Общая площадь нарушенных территорий в 2022 г. составляла 82,1 км^2 или 8,8 %. Проведена параметризация и верификация распределенной гидрологической модели «Гидрограф» для бассейна р. Сусуман без учета нарушенных территорий. Период моделирования составил 1966–1987 гг. Средний критерий Нэша-Сатклиффа составил 0,59, невязка слоя стока 12 мм или 4 %. Результаты моделирования в значительной мере зависят от качества и репрезентативности входных метеорологических данных об осадках. Следующим этапом станет определение параметров нарушенных ландшафтов и

проведение численных экспериментов на основе гидрологической модели «Гидрограф» для оценки влияния россыпной золотодобычи на речной сток.

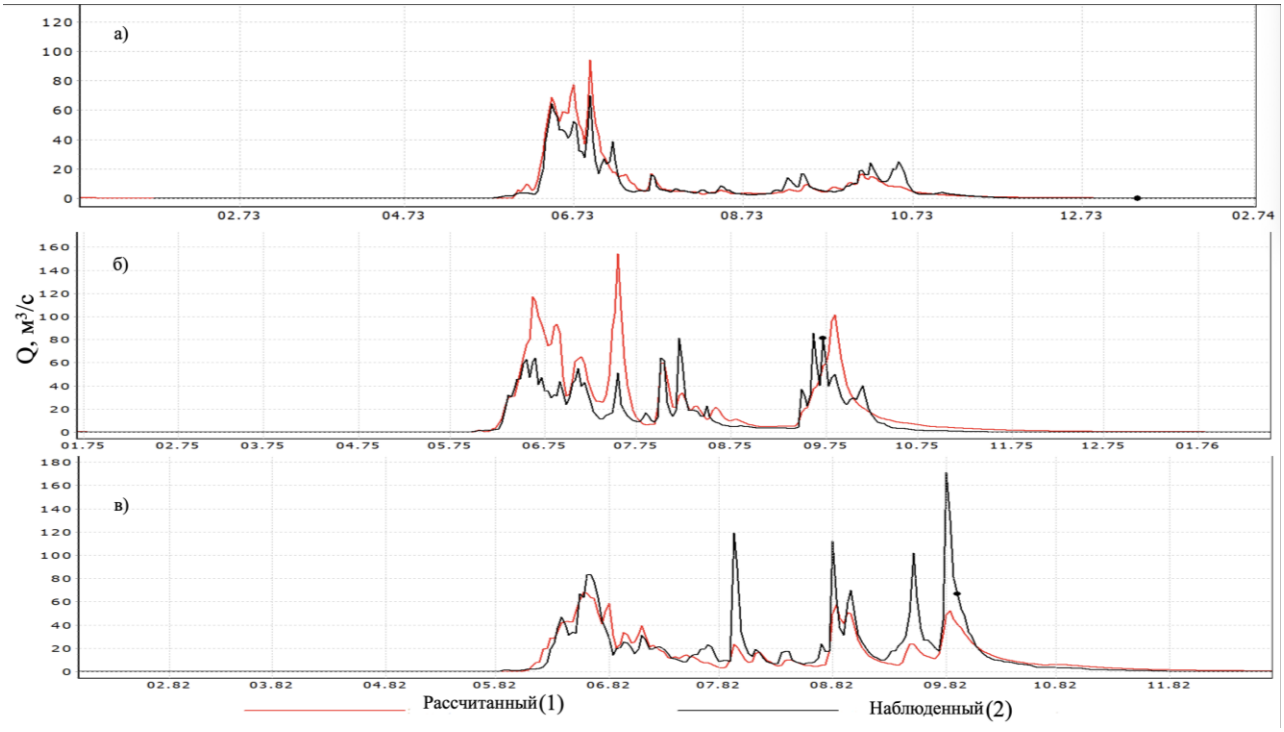


Рисунок 4. Рассчитанный (1) и наблюденный (2) гидрографы стока р. Сусуман – п. Тонгора: а) 1973 г. NS = 0,81; б) 1975 г. NS = 0,16; в) 1982 г. NS = 0,64

Figure 4. Calculated (1) and observed (2) flow hydrographs of Susuman river –Tongora village: a) 1973 г. NS = 0,81; b) 1975 г. NS = 0,16; c) 1982 г. NS = 0,64

Благодарности

Исследование проводится в рамках проекта Российского научного фонда и правительства Магаданской области № 23–17–20011 «Оценка рисков опасных явлений для инфраструктуры Магаданской области, вызванных климатически- и антропогенно-обусловленной трансформацией многолетнемерзлых пород».

Acknowledgments

The study is conducted with the support of the Russian Science Foundation and the Government of the Magadan region (project 23-17-20011).

Литература

Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А. Математическое моделирование в гидрологии. М.: Издательский центр «Академия», 2010. 298 с.

Илюшина П.Г., Шихов А.Н., Макарьева О.М. Картографирование негативного воздействия золотодобывающих предприятий на природную среду криолитозоны по спутниковым данным (на примере Магаданской области) // Исследование Земли из космоса. 2023. №1. С. 41–52.

Королев Ю.Б. Картографирование растительного покрова в связи с оценкой его гидрологической роли (на примере Верхней Колымы). Автореф.

References

Dzhamalov R.G., Frolova N.L., Kireeva M.B. Current changes in river water regime in the Don River Basin. *Water resources*, 2013, vol. 40, pp. 573–584.

Egidarev E.G., Simonov E.A. Assessment of the Environmental Effect of Placer Gold Mining in the Amur River Basin. *Water Resources*, 2015, vol. 42(7), pp. 897–908.

Gartner J.E., Bigio E.R., Cannon S.H. *Compilation of post wildfire runoff-eventdata from the western United States.* (online: USGS Open-File Report 2004–1085 http://pubs.usgs.gov/of/2004/1085).

Дис. ... канд. биол. наук. Днепропетровск, 1985. 24 с.

Макарьева О.М., Лебедева Л.С., Виноградова Т.А. Моделирование процессов формирования стока в малых горных водосборах криолитозоны (по материалам Колымской водобалансовой станции) // Криосфера Земли. 2020. Том 24, № 1. С. 43–56.

Семенова О.М., Лебедева Л.С., Волкова Н.В., Шалина Е.В. Использование спутниковых данных для исследования процессов формирования стока в бассейне р. Витимкан (зона распространения многолетней мерзлоты) // Исследование Земли из космоса. 2015. №. 3. С. 15–26. DOI: 10.7868/S0205961415030124

Справочник по климату СССР Чукотский национальный округ и Магаданская область. Вып. 34, ч. 2, М.: Гидрометеоиздат, 1966. 288 с.

Христов В.К. Страницы истории: 80 лет Сусуманскому ГОКу, 65 лет Сусуманскому району. Магадан: Охотник, 2018. 279 с.

Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Под ред. Катцов В.М. СПб.: Наукоемкие технологии. 2022. 124 с.

Шпикерман В.И., Васькин А.Ф., Желебогло О.В. Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1:1 000 000. Третье поколение. Серия Верхояно-Колымская. Лист P-55 (Сусуман). Геологическая карта, составлена: ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2016.

Dzhamalov R.G., Frolova N.L., Kireeva M.B. Current changes in river water regime in the Don River Basin // Water resources. 2013. Vol. 40. P. 573–584.

Egidarev E.G., Simonov E.A. Assessment of the Environmental Effect of Placer Gold Mining in the Amur River Basin // Water Resources. 2015. Vol. 42(7). P. 897–908.

Gartner J.E., Bigio E.R., Cannon S.H. Compilation of post wildfire runoff-eventdata from the western United States. (online: USGS Open-File Report 2004–1085 http://pubs.usgs.gov/of/2004/1085).

Jarsjö J., Chalov S.R., Pietroń J., Alekseenko A.V., Thorslund J. Patterns of soil contamination, erosion and river loading of metals in a gold mining region of northern Mongolia // Reg. Environ. Change. 2017. Vol. 17. P. 1991–2005.

Iliushina P.G., Shikhov A.N., Makarieva O.M. Mapping of the negative impact of gold mining on the natural environment of permafrost zone from satellite data (case of Magadan region). *Issledovanie Zemli iz kosmosa [Earth Observation and Remote Sensing],* 2023, no. 1, pp. 41–52 (In Russian).

Jarsjö J., Chalov S.R., Pietroń J., Alekseenko A.V., Thorslund J. Patterns of soil contamination, erosion and river loading of metals in a gold mining region of northern Mongolia. *Reg. Environ. Change*, 2017, vol. 17, pp. 1991–2005.

Khristov, V.K. *History Pages. 80 Years of Susuman GOK. 65 Years of Susumansky District*. Magadan, Russia: Okhotnik publisher, 2018. 280 p. (In Russian).

Korolev Yu.B. *Kartografirovanie rastitelnogo pokrova v svyazi s ocenkoj ego gidrologicheskoj roli (na primere Verhnej Kolymy). [Mapping of vegetation cover in connection with the assessment of its hydrological role (on the example of the Upper Kolyma)]*, abstract. Diss. ... Cand. Biol. Sciences'. Dnepropetrovsk, 1985. 24 p. (In Russian).

Lawrence S., Grove J., Davies P., Turnbull J., Rutherfurd I., Macklin M. Historical dredge mining as a significant anthropomorphic agent in river systems: A case study from south-eastern Australia. *The Holocene*, 2021, vol. 31, no. 7, pp. 1158–1174.

Makarieva O., Nesterova N., Lebedeva L., Sushansky S. *Water-balance and hydrology database for a mountainous permafrost watershed in the up-streams of the Kolyma River, Russia – the Kolyma Water-Balance Station*, 1948–1997. PANGAEA. 2017. DOI:10.1594/PANGAEA.881731 (дата обращения: 20.12.2023).

Makarieva O.M., Lebedeva L.S., Vinogradova T.A. Modeling of runoff formation processes in small mountain catchments of the cryolithozone (based on materials from the Kolyma Water Balance Station). *The Cryosphere of the Earth*, 2020, vol. 24, no. 1. pp. 43–56. (In Russian).

Moody J.A., Martin D.A., Haire S.L., Kinner D.A. Linking runoff response to burn severity after wildfire. *Hydrological Processes*, 2008, vol. 22, pp. 2063–2074.

Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. River flow forecasting through conceptual mgdels, part 1-a discussion of principles. *J. Hydrol.,* 1970, vol 10, pp. 282–290.

Lawrence S., Grove J., Davies P., Turnbull J., Rutherfurd I., Macklin M. Historical dredge mining as a significant anthropomorphic agent in river systems: A case study from south-eastern Australia // The Holocene. 2021. Vol. 31. No. 7. P. 1158–1174.

Makarieva O., Nesterova N., Lebedeva L., Sushansky S. Water-balance and hydrology database for a mountainous permafrost watershed in the up-streams of the Kolyma River, Russia - the Kolyma Water-Balance Station, 1948-1997. PANGAEA. 2017. DOI:10.1594/PANGAEA.881731 (дата обращения: 20.12.2023).

Moody J.A., Martin D.A., Haire S.L., Kinner D.A. Linking runoff response to burn severity after wildfire // Hydrological Processes. 2008. Vol. 22. P. 2063–2074.

Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. River flow forecasting through conceptual mgdels, part 1-a discussion of principles // J. Hydrol. 1970. Vol. 10. P. 282–290.

Neary D.G., Gottfried G.J. Fires and floods: post-fire watershed responses. In: Viegas V.R. (Ed.), Forest Fire Research & Wildland Fire Safety. Millpress, Rotterdam, 2002. P. 1–9.

Pausas J.G., Llovet J., Rodrigo A., Vallejo R. Are wildfires a disaster in the Mediterranean basin? // International Journal of Wildland Fire. 2008. Vol. 17. P. 713–723.

Shikhov A., Ilyushina P., Makarieva O., Zemlianskova A., Mozgina M. Satellite-Based Mapping of Gold-Mining-Related Land-Cover Changes in the Magadan Region, Northeast Russia // Remote Sensing. 2023. Vol. 15(14), P. 3564. DOI:10.3390/rs15143564.

Zemtsov S.P., Baburin V.L., Koltermann K.P., Krylenko I.N., Yumina N.M., Litvinov V.Yu. Social risk and vulnerability assessment of hazardous hydrological phenomena in Russia. *Geography, environment, sustainability*. 2014; 7(4). P. 95–117. DOI:10.24057/2071-9388-2014-7-4-95-117.

Neary D.G., Gottfried G.J. Fires and floods: post-fire watershed responses. In: Viegas V.R. (Ed.), *Forest Fire Research & Wildland Fire Safety*. Millpress, Rotterdam, 2002, pp. 1–9.

Pausas J.G., Llovet J., Rodrigo A., Vallejo R. Are wildfires a disaster in the Med-iterranean basin? *International Journal of Wildland Fire*, 2008, vol. 17, pp. 713–723.

Semenova O.M., Lebedeva L.S., Volkova N.V., Shalina E.V. Using satellite data to study the processes of runoff formation in the river basin Vitimkan (permafrost distribution zone). *Issledovanie Zemli iz kosmosa [Exploration of the Earth from space]*, 2015, no. 3, pp. 5–15. DOI: 10.7868/S0205961415030124 (In Russian).

Shikhov A., Ilyushina P., Makarieva O., Zemlianskova A., Mozgina M. Satellite-Based Mapping of Gold-Mining-Related Land-Cover Changes in the Magadan Region, Northeast Russia. *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15(14), 3564. DOI:10.3390/rs15143564.

Shpikerman V.I., Vaskin A.F., Zheleboglo O.V. *Russia 1:1000000 Scale Geological Maps (Third Generation). Verkhoyano-Kolyma series. Sheet Index P-55 (Susuman).* Publ. Russian Geological Research Institute, 2016. (In Russian).

Spravochnik po klimatu USSR Chukotskii natsionalnyi okrug i Magadanskaia oblast [USSR Climate Handbook Chukotsky National District and Magadan Region], vol. 34(2), Moscow, Gidrometeoizdat Publisher, 1966, 288 p. (In Russian).

Tretii ocenochnyi doklad ob izmeneniyah klimata i ih posledstviyah na territorii Rossiiskoi Federacii. [The third assessment report on climate change and its consequences in Russian Federation. General summary]. Ed. Kattsov V.M. St. Petersburg: High-tech technologies. 2022. 124 p. (In Russian).

Vinogradov Yu.B., Vinogradova T.A. *Mathematical modeling in hydrology*. M., Publ. Center Academy, 2010. 298 p. (In Russian).

Zemtsov S.P., Baburin V.L., Koltermann K.P., Krylenko I.N., Yumina N.M., Litvinov V.Yu. Social risk and vulnerability assessment of hazardous hydrological phenomena in Russia. *Geography, environment, sustainability,* 2014, vol. 7(4), pp. 95–117. DOI:10.24057/2071-9388-2014-7-4-95-117.

УДК 624.131.53 DOI: 10.34753/HS.2023.5.3.256

ОБ АППРОКСИМАЦИИ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ГРУНТА СДВИГУ ОТ НОРМАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ

А.Ю. Виноградов[1,2], В.А. Обязов[1,3]

[1]ООО НПО «Гидротехпроект», г. Валдай, Россия; [2]ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», г. Санкт-Петербург, Россия;
3 ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет», г. Санкт-Петербург, Россия
gd@npogtp.ru

Аннотация. Сопротивление грунтов сдвигу, зависит от их физического и напряженного состояния, и относится к основным прочностным характеристикам, определяющим мероприятия по защите от таких опасных процессов, как сели, размыв и разрушение коренных и аллювиальных пород берегов под воздействием прибоя и руслового потока, оползней и обвалов, а также используется при проектировании любых зданий и сооружений. В связи с этим получение расчетных величин прочностных свойств грунтов имеет весьма важное значение. Определение предельных нагрузок базируется на экспериментальной зависимости между давлением и сопротивлением грунтов сдвигу. Согласно нормативной документации, эта зависимость принята линейной, а определение касательного сопротивления сдвигу используемых при лабораторных исследованиях грунтов выполняется при нормальном давлении, чаще всего принимаемом равным 0,1, 0,2 и 0,3 МПа. Учитывая, что большинство существующих и проектируемых зданий и сооружений, в том числе сооружений инженерной защиты, имеют невысокую нагрузку на основание (менее 0,1 МПа), исследование образцов грунта было проведено не только в рекомендованном диапазоне нормального давления 0,1–0,3 МПа, но и при меньших его значениях. В случае

ABOUT THE APPROXIMATION OF THE DEPENDENCE OF SOIL SHEAR RESISTANCE ON NORMAL PRESSURE

Alexey Yu. Vinogradov[1,2], Viktor A. Obyazov[1,3]

[1]Scientific and Industrial Research Association "Gidrotehproekt", Valday, Russia;
[2] Saint Petersburg State Forest Technical University, St. Petersburg, Russia;
[3]Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia

gd@npogtp.ru

Abstract. Soil shear resistance, depending on their physical and stressed state, is characterized by basic strength characteristics. These characteristics determine measures to protect against such dangerous processes as mudflows, erosion and destruction of indigenous and alluvial rocks of the shores under the influence of surf and channel flow, landslides, as well as during the construction of any buildings and structures. In this regard, obtaining calculated values of the strength properties of soils is crucial. The determination of limit loads is based on the experimental relationship between pressure and soil shear resistance. According to the regulatory documentation, this dependence is assumed to be linear, and the determination of the shear resistance of soils used in laboratory studies is performed at normal pressure, most often assumed to be 0.1, 0.2 and 0.3 MPa. Considering that most existing and projected buildings and structures, including engineering protection structures, have a low load on the base (less than 0.1 MPa), the study of soil samples was carried out not only in the recommended range of normal pressure of 0.1–0.3 MPa, but also at lower values. In the case of standard loads recommended by GOST, the dependence of soil shear resistance on normal pressure can be approximated by a straight line. But in the area of relatively low pressures, this dependence is nonlinear. This pattern was

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

стандартных, рекомендованных ГОСТ, нагрузок зависимость сопротивления грунта сдвигу от нормального давления вполне можно аппроксимировать прямой линией. Но в области относительно малых давлений эта зависимость является нелинейной. Указанная закономерность подтвердилась при всех многочисленных лабораторных испытаниях на образцах как связных, так и несвязных грунтов, подготовленных согласно соответствующей нормативной документации, а также на пробах монолитов связного грунта, отобранного непосредственно из береговых обнажений. Подобные результаты ранее получал и один из основоположников отечественного грунтоведения Н.А. Цытович. Однако в более поздних работах он перевел акцент именно на линейную составляющую исследуемой зависимости. Подбор наиболее подходящей функции для ее аппроксимации, выполненный в данной работе, показал, что она является степенной.

Ключевые слова: грунты; связные грунты; несвязные грунты; сопротивление сдвигу; нормальное давление; сцепление; внутреннее трение.

confirmed in all numerous laboratory tests on samples of both cohesive and non-cohesive soils prepared in accordance with the relevant regulatory documentation, as well as on samples of monoliths of cohesive soil taken directly from coastal outcrops. Similar results were previously obtained by one of the founders of Russian soil science N.A. Cytovich. However, in later works, he shifted the focus specifically to the linear component of the dependence under study. The selection of the most suitable function for its approximation, performed in this paper, showed that it is a power function.

Keywords: soils; cohesive soils; non-cohesive soils; shear resistance; normal pressure; adhesion; internal friction.

Введение

При проектировании сооружений инженерной защиты от таких опасных процессов как сели – в случае транспортно-сдвигового процесса [Виноградов, 1980], размыв и разрушение коренных и аллювиальных пород берегов под воздействием прибоя и руслового потока, оползней и обвалов существенное значение приобретает получение расчетных величин прочностных свойств грунтов[1,2]. Эти свойства важно знать при возведении любых зданий и сооружений[3]. Основным прочностным показателем грунтов является сопротивление сдвигу, зависящее от физического и напряженного состояния [Цытович, 1963].

Критичной ситуацией для грунтов при нагружении является сдвиг по поверхности с наименьшей несущей способностью. Разрушение грунта происходит при преодолении тангенциальным напряжением предела прочности на сдвиг, обусловленного внутренним трением и сцеплением грунта.

«Единственная причина разрушения грунта – образование сдвига. Осадки в этой фазе нагрузок становятся неравномерными и порывистыми, эпюра осадок приобретает неправильный характер. Кроме вертикальных осадок появляются сдвиги фундаментов в

[1] СП 116.13330.2012 Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения.
[2] СП 436.1325800.2018. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от оползней и обвалов. Правила проектирования.
[3] СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений.

сторону» [Герсеванов, 1948]. Следовательно, характеристиками, определяющими величину деформации грунтов, в том числе при нагрузках, превышающих критические, являются сцепление и внутреннее трение.

Определение предельных нагрузок в основаниях сооружений, прогноз устойчивости откосов при оползнях природных склонов и устойчивости земляных сооружений – все это базируется на экспериментальной зависимости между давлением и сопротивлением грунтов сдвигу [Цытович, 1963.]. Эта зависимость принята линейной[4,5]. Согласно ГОСТ, коэффициент при функции – традиционно определяемый как угол внутреннего трения ($tg\varphi$) и свободный член уравнения (c) – как сцепление, увязаны между собой в тангенциальное напряжение: $\tau = \sigma \cdot tg\varphi + c$, где σ – нормальное, а τ – тангенциальное давления. Данное уравнение известно как закон Кулона для сыпучих и связных грунтов: сопротивление грунтов сдвигу есть функция первой степени от нормального давления [Цытович, 1983]. С физической точки зрения данное напряжение является напряжением, **удерживающим** грунтовое тело от сдвига. Чем выше значения сцепления и угла внутреннего трения, тем более устойчивым является грунт [Виноградов Ю.Б., 1980].

Параметры механических свойств грунтов, (угол внутреннего трения φ, удельное сцепление c) необходимо оценивать согласно требованиям всех основных регламентирующих документов: СП 22.13330.2016[3] (п. 2.10), СП 50-101-2004[6] (п. 5.3.1), СП 23.13330.2018[7] (п. 2.3).

Материалы и методы

При проведении исследований использованы пробы грунта различного гранулометрического состава как связные (супеси), так и несвязные (песок среднезернистый), подготовленные согласно ГОСТ 12248.1-2020[4]. Кроме того, лабораторным исследованиям были подвержены пробы монолитов связного грунта (супесь), отобранного непосредственно из береговых обнажений безымянного притока р. Порусья. Всего проведено 67 исследований специально подготовленных грунтов и 28 исследований монолитов. Все образцы по показателям текучести $I_L < 1{,}0$.

Согласно п. 3.3 ГОСТ 12248.1-2020[4] испытания на срез грунта проводится методом только консолидированно-дренированного среза. В предыдущем ГОСТ 12248-2010[8], согласно п. 5.1.1.4, предложены к использованию два метода:

- консолидированно-дренированный (медленный) срез – для песков, глинистых и органоминеральных грунтов независимо от их коэффициента водонасыщения для определения эффективных значений φ^I и c^I;

- неконсолидированный быстрый срез – для водонасыщенных глинистых и органоминеральных грунтов, имеющих показатель текучести 0,5, и просадочных грунтов, приведенных в водонасыщенное состояние замачиванием без приложения нагрузки, для определения φ и c в нестабилизированном состоянии.

Сравнительный анализ прочностных характеристик грунтов, полученных этими методами, остается за рамками настоящей статьи. Один из основоположников отечественного грунтоведения – Н.А. Цытович – считал заслуживающими доверия именно результаты консолидированно-дренированного среза. В данной работе использовался метод консолидированно-дренированного среза.

При быстром срезе влажность и плотность грунта не успевают измениться, при медленном – каждому шагу нормального давления соответствуют свои плотность и влажность грунта, т.е. испытаниям подвергается априори различный грунт. В качестве варианта решения этой проблемы Н.А. Цытович предложил вначале загрузить грунт максимально возможным давлением при планируемых испытаниях, потом

[4] ГОСТ 30416-2020. Грунты. Лабораторные испытания. Общие положения.
[5] ГОСТ 12248.1-2020. ГОСТ 12248.1-2020. Грунты. Определение характеристик прочности методом одноплоскостного среза.
[6] СП 50-101-2004. Проектирование и устройство оснований и фундаментов зданий и сооружений.
[7] СП 23.13330.2018. Основания гидротехнических сооружений.
[8] ГОСТ 12248-2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости.

разгрузить его и в дальнейшем подвергать испытаниям полученную заготовку [Цытович, 1963]. Таким образом, грунт для испытаний будет действительно однородным, но он будет иметь мало общего с первоначальным грунтом, следовательно, результаты испытаний можно будет использовать только после соответствующей интерпретации. К сожалению, подобной интерпретации нет, и дискуссия на эту тему отсутствует.

Согласно ГОСТ 12248.1—2020[4] определение касательного сопротивления сдвигу используемых нами при лабораторных исследованиях грунтов выполняется при нормальном давлении, равном 0,1, 0,2 и 0,3 МПа. Однако, большинство существующих и проектируемых зданий и сооружений имеют малую этажность и невысокую нагрузку на основание (таблица 1).

Таблица 1. Средняя нагрузка на грунт, создаваемая различными зданиями и сооружениями
Table 1. Average ground load generated by various buildings and structures

№	Наименование	Тип сооружения	Проект	Расчетное давление, МПа
1	Котельная	Типовой проект блочно-модульной котельной 4,0 МВт	903-1-312.96	0,05
2	Школа	Типовой проект средней образовательной школы	225-1-413	0,052
3	Канализационные очистные сооружения	Типовой проект канализационных очистных сооружений 25 м^3/сут	402-22-61.86	0,038
4	Производственный корпус по изготовлению железобетонных изделий	Типовой проект завода железобетонных изделий мощностью 50 тыс. м^3/год	409-10-44	0,033 (0,068*)
5	9 этажный кирпичный жилой дом	Типовой проект жилого дома 9 этажей	85-012/1.2	0,122

* давление наиболее нагруженной части сооружения

Усредненный вес 1 м^3 зданий и сооружений с учетом полезной загрузки составляет 6,5 кН, т.е. давление, оказываемое 1 м^3 условного здания на 1 м^2 составляет 0,0065 МПа, следовательно, осредненное давление шестиэтажного здания на грунт не превышает 0,1 МПа.

Таблица 2. Средняя этажность по городам РФ [https://info.2gis.ru/ufa/company/news/2gis-podschital-srednyuyu-etazhnost-gorodov]
Table 2. Average number of floors by cities of the Russian Federation

Город	Этажность
Москва	6
Санкт-Петербург, Уфа, Екатеринбург, Казань, Воронеж, Челябинск, Красноярск	5
Новосибирск, Липецк, Пермь, Нижний Новгород, Саратов, Рязань, Самара, Владивосток, Волгоград, Иркутск	4
Краснодар, Астрахань	3

Поскольку средняя этажность по городам РФ не превышает 6 этажей ни в одном городе (таблица 2), можно сделать вывод, что большинство построенных и проектируемых зданий и сооружений в стране создают давление на грунт меньшее, чем рекомендованная ГОСТ величина 0,1 МПа. Все сооружения инженерной защиты, водопропускные и водоотводные попадают в диапазон 0,01–0,02 МПа.

Учитывая данное обстоятельство, проведенное нами исследование образцов грунта выполнялось не только в рекомендованном диапазоне нормального давления 0,1–0,3 Мпа, но и при его значениях, меньших 0,1 Мпа.

Результаты

В случае стандартных, рекомендованных ГОСТ, нагрузок зависимость $\tau = f(\sigma)$ вполне можно аппроксимировать прямой линией (рисунок 1а). Но в области относительно малых давлений эта зависимость становится нелинейной. Наиболее подходящей функцией для ее аппроксимации является степенная (рисунок 1б).

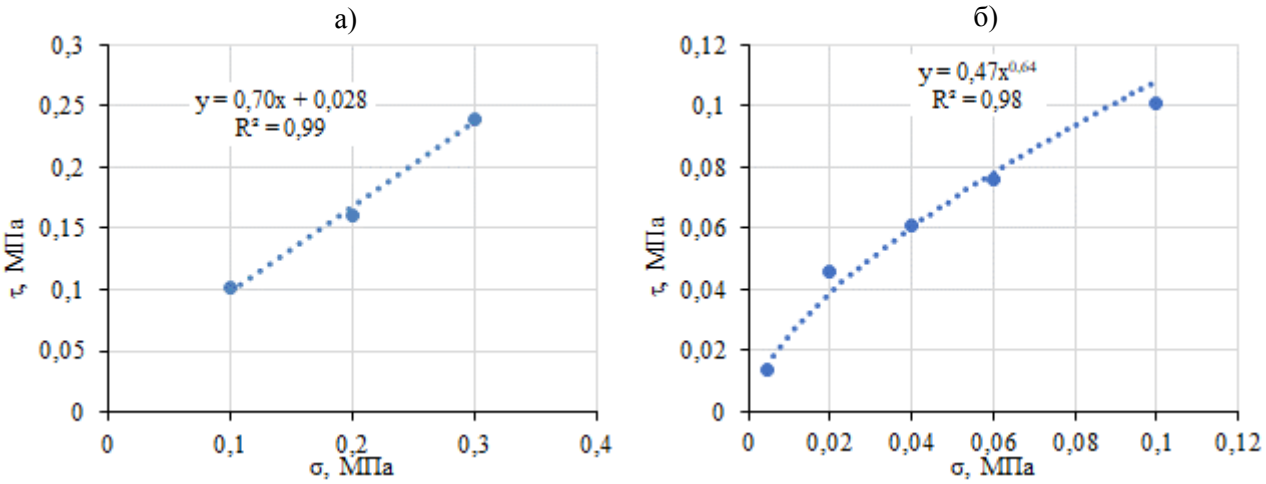


Рисунок 1. Диаграммы сопротивления сдвигу крупнозернистого песка при нормальном давлении 0,1–0,5 МПа (а) и меньше 0,1 МПа (б)

Figure 1. Diagrams of shear resistance of coarse-grained sand at normal pressure of 0.1–0.5 MPa (a) and less than 0.1 MPa (b)

На основании наших множественных испытаний несвязных грунтов на плоскостной сдвиг можно сделать вывод, что при нормальных нагрузках 0,1 МПа и менее диаграмма имеет ярко выраженную степенную зависимость и ***не*** представляет собой прямой, исходящей из начала координат (рисунок 2).

Обсуждение

В рамках нашего рассмотрения интересна трансформация интерпретации результатов зависимости сопротивления сдвигу от нормального давления σ в ранних [Цытович, 1940] (рисунок 3а) и поздних трудах Н.А. Цытовича [Цытович, 1963; Цытович, 1983] (рисунок 3б).

Н. А. Цытович [Цытович, 1940] предлагает рассматривать полученную диаграмму как состоящую из двух частей: с большей кривизной от 0 до σ_φ, и прямолинейной: от σ_φ до нормального давления 0,5–1,0 МПа. В указанной работе величина σ_φ принята для глин 0,05–0,07 МПа, для песков – 0,1 МПа и выше.

В свою очередь, сопротивление грунта сдвигу на криволинейном участке слагается также из двух частей – первой, соответствующей нулевому давлению (c) – молекулярное сцепление грунта и второй, изменяющейся по криволинейному закону.

Для криволинейного участка тангенс угла является величиной переменной. Для линейного, с достаточной для практических целей точностью, по мнению Н. А. Цытовича, тангенс считается величиной постоянной [Цытович, 1940]. Данное утверждение является спорным, поскольку автор не обозначил критериев, на основании которых он его выдвинул и обосновал.

В последующей своей фундаментальной работе [Цытович, 1963], Н. А. Цытович указывал, что коэффициент внутреннего трения связных грунтов может считаться величиной постоянной только при полном уплотнении грунта во время испытания.

Загружая грунт максимально возможным давлением с последующей разгрузкой, мы имеем дело с новым образцом, возможно, кардинально отличающимся от первоначального. Понимания у проектировщика, как будет вести себя естественный грунт при планируемых воздействиях априори быть не может.

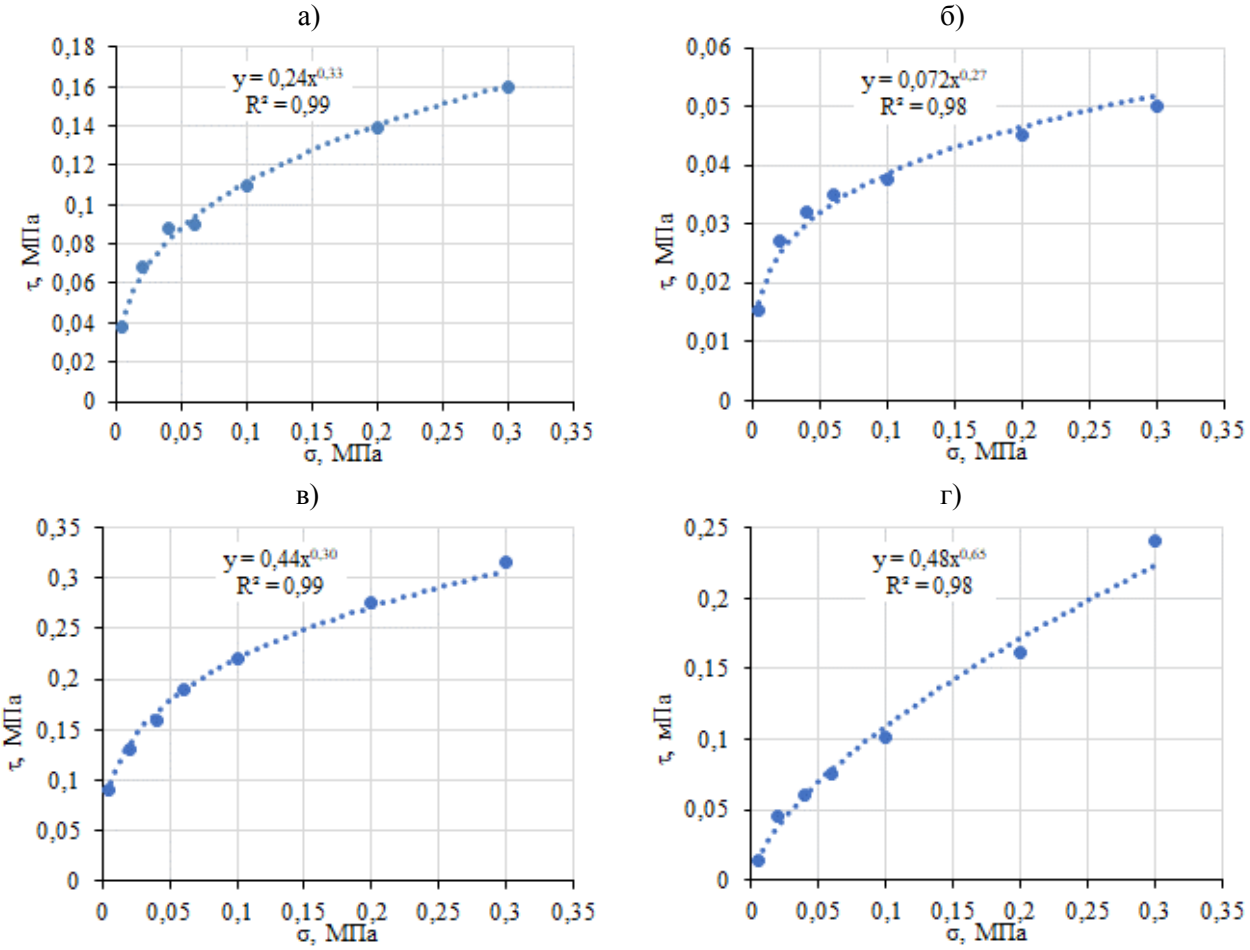
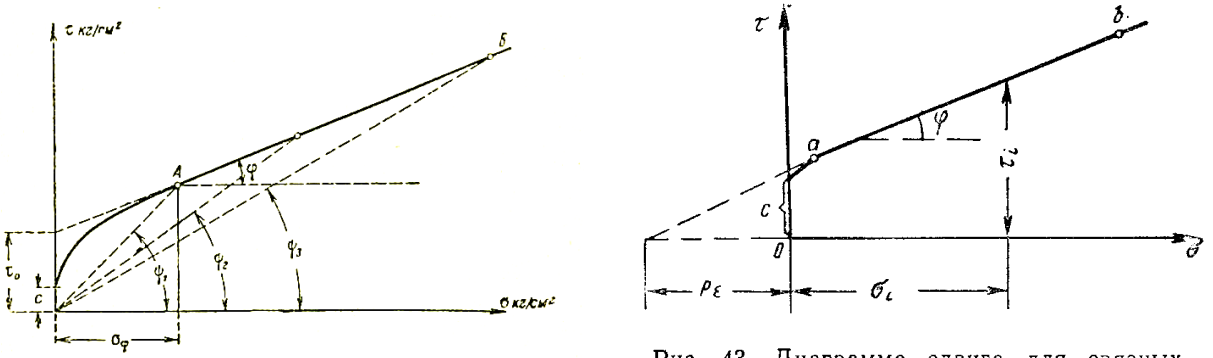


Рисунок 2. Диаграммы сопротивления сдвигу для связных и несвязных грунтов:
а – супесь с плотностью 1,96 т/м^3 и влажностью 0,2; б – супесь с плотностью 2,04 т/м^3 и влажностью 0,2; в – супесь (монолит) с плотностью 2,08 т/м^3 и влажностью 0,23; г – песок среднезернистый с плотностью 2,12 т/м^3 и влажностью 0,14

Figure 2. Shear resistance diagrams for cohesive and non–cohesive soils:
a – sandy loam with a density of 1.96 t/m^3 and a humidity of 0.2; b – sandy loam with a density of 2.04 t/m^3 and a humidity of 0.2; c – sandy loam (monolith) with a density of 2.08 t/m^3 and a humidity of 0.23; d – medium-grained sand with a density of 2.12 t/m^3 and humidity 0.14

а) б)



Фиг. 32. Диаграмма зависимости сопротивления сдвигу от давления.

Рис. 43. Диаграмма сдвига для связных грунтов при консолидированно-дренированном испытании

Рисунок 3. Диаграмма зависимости касательного сопротивления сдвигу τ от нормального напряжения σ: а – [Цытович, 1940]; б – [Цытович, 1963]

Figure 3. Diagram of the dependence of the tangential shear resistance τ on the normal voltage σ: a – [Cytovich, 1940]; b – [Cytovich, 1963]

Для несвязных грунтов (пески), при нормальном давлении в диапазоне 0,1–0,5 МПа [Цытович, 1963] изменениями плотности можно пренебречь. Как показывают результаты многочисленных испытаний, для сыпучих грунтов, диаграмма сопротивления сдвигу представляет собой строго прямую, исходящую из начала координат под углом φ к оси нормальных давлений [Цытович, 1963]. Сопротивление сыпучих грунтов сдвигу есть сопротивление их трению, прямо пропорциональное нормальному давлению.

По Н. А. Цытовичу, практике необходимо значение максимально возможного сопротивления грунтов сдвигу. На наш взгляд, как практикующих инженеров, это утверждение спорно. Для сооружений инженерной защиты важно знать ***минимально*** возможное сопротивление ***ненагруженного*** грунта, поскольку именно оно определяет начальную устойчивость массива грунта.

Далее по Н. А. Цытовичу – «многочисленные испытания связных грунтов на сопротивление их прямому сдвигу показывают, что все экспериментальные точки (при давлениях меньших 0,7 МПа) весьма точно укладываются на прямую линию» [Цытович, 1963, с. 172]. Криволинейная часть диаграммы в поздней монографии практически вышла из рассмотрения и на соответствующем рисунке почти не видна (рисунок 3б).

Наш опыт подсказывает, что все диаграммы $\tau = f(\sigma)$ имеют ярко выраженную степенную зависимость (см. рисунок 2). Функциональная зависимость сопротивления сдвигу от нормального давления по раннему Н.А. Цытовичу также представляет собой степенную функцию вида $\tau = a \cdot \sigma^b$ (см. рисунок 3а).

Основная часть грунтоведения, построенная на оценке прочностных свойств грунтов по принципу линейности уравнения Кулона, имеет область интересов за пределами реальной жизни. Значения касательного напряжения большинства связных грунтов при нормальных нагрузках 0,05–0,25 МПа так же неплохо аппроксимируются степенной зависимостью.

По сути, задача сводится к подбору уравнения, наилучшим образом аппроксимирующего полученные эмпирическим путем значения тангенциальных сдвиговых напряжений в зависимости от нормальной нагрузки, приложенной к образцу. Простой оценкой величины достоверности аппроксимации является сравнительное значение R^2 (таблица 3).

Таблица 3. Аппроксимация различными зависимостями функции сопротивления сдвигу от нормального давления. Суглинок полутвердый, Тверская обл., данные 2002, 2020 гг.
Table 3. Approximation of the shear resistance function by various dependencies on normal pressure. Semi-solid loam, Tver region, data for years 2002, 2020

Скважина №	Глубина, м	Зависимость		
		линейная	степенная	логарифмическая
6338	17,2	1,000	0,999	0,978
	17,5	0,977	0,990	1,000
6339	20,2	0,999	1,000	0,987
	20,8	0,999	1,000	0,986
3	16,5	0,998	0,992	0,962
	14,6	0,999	0,995	0,974
14	22	0,935	0,883	0,842
15	22,2	0,994	0,970	0,949
	22,8	1,000	0,992	0,978

Действительно, прямая зависимость ($y = ax + b$), в среднем, неплохо аппроксимирует три эмпирические значения τ, полученные по заданным, согласно требованиям ГОСТ, нормальным значениям σ, хотя полученные результаты чаще всего и выходят за область

практического интереса. Как отметил еще Терцаги [Терцаги, 1961], результаты испытаний грунтов на сдвиг могут быть с ***некоторой*** точностью выражены зависимостью Кулона. Однако, если мы изучаем реальный грунт и хотим оценить его поведение в природных условиях или при обычных нагрузках – мы должны провести испытания при нормальных напряжениях в диапазоне 0–0,3 МПа не менее, чем в 6–7 точках. В этом случае, сомнений в правильности выбора степенной зависимости у нас не будет.

Выводы

1. Линейный вид уравнения сопротивления сдвигу вида $\tau_i = a\sigma_i + b$ с учетом значений из диапазона относительно малых давлений не соответствует эмпирическим данным.

2. Наилучшее совпадение наблюденным значениям дает степенное уравнение вида $\tau_i = a(\sigma_i)^b$, аппроксимирующее зависимость сопротивления грунта сдвигу от нормального давления.

Литература

Виноградов Ю.Б. Этюды о селевых потоках. Гидрометеоиздат, 1980. 144 с.

Герсеванов Н.М. Свайные основания и расчет фундаментов сооружений. М.: Стройвоенмориздат, 1948. 270 с.

Терцаги К. Теория механики грунтов. М.: Гостройиздат, 1961. 507 с.

Цытович Н.А. Механика грунтов. Л.–М.: Государственное издательство строительной литературы, 1940. 389 с.

Цытович Н.А. Механика грунтов: [Учеб. пособие для гидротехн. и строит. специальностей вузов]. 4-е изд., вновь перераб. и доп. М.: Госстройиздат, 1963. 636 с.

Цытович Н.А. Механика грунтов (краткий курс): Учебник для строит. вузов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1983. 288 с.

References

Vinogradov Yu. B. *Etyudy o selevyh potokah [Studies on mudflows]*. Hydrometeoizdat, 1980. 144 p.

Gersevanov N.M. *Svajnye osnovaniya i raschet fundamentov sooruzhenij [Pile foundations and calculation of foundations of structures]*. M: Publ. Strojvoenmorizdat, 1948. 270 p. (In Russian).

Terczagi K. *Teoriya mexaniki gruntov [Theory of soil mechanics]*. M: Publ. Gostrojizdat, 1961. 507 p. (In Russian).

Cytovich N.A. *Mexanika gruntov [Soil mechanics]*. Leningrad–Moskva: Publ. Gosudarstvennoe izdatel`stvo stroitel`noj literatury`, 1940. 389 p. (In Russian).

Cytovich N.A. *Mexanika gruntov: [Ucheb. posobie dlya gidrotexn. i stroit. special`nostej vuzov]. 4-e izd., vnov` pererab. i dop. [Soil mechanics: [Textbook for hydraulic engineering. and builds. university specialties]*. M: Publ. Gosstrojizdat, 1963. 636 p. (In Russian).

Cytovich N.A. *Mexanika gruntov (kratkij kurs): Uchebnik dlya stroit. vuzov. 4-e izd., pererab. i dop. [Soil Mechanics (short course): A textbook for builds. universities. 4th edition revised and expanded]*. M: Publ. Vy`sshaya shkola, 1983. 288 p. (In Russian).

УДК 574.65+632.5: 621.039 DOI: 10.34753/HS.2023.5.3.264

ИНВАЗИИ ТЕПЛОЛЮБИВОЙ ВОДНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ КАК УГРОЗА ЧРЕЗВЫЧАЙНОЙ СИТУАЦИИ НА ОБЪЕКТАХ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

В.Н. Безносов[1], А.Л. Суздалева[2]

[1]ООО НПО «Гидротехпроект», г. Валдай, Россия;
[2]ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», г. Москва, Россия
SuzdalevaAL@yandex.ru

Аннотация. В настоящее время возник высокий риск инвазии в водоемы-охладители АЭС ряда видов теплолюбивой плавающей растительности. Наибольшую опасность представляют водный гиацинт, пистия и гигантская сальвиния. Массовое развитие этих растений в водных объектах многих стран уже вызвало катастрофические последствия. Они внесены в международные и национальные перечни наиболее опасной сорной водной растительности. В результате стремительного размножения данные растения способны в течение короткого срока покрыть всю поверхность водного объекта. Это создает серьезные биологические помехи в работе систем водоснабжения, ирригации и объектов энергетики; затрудняет судоходство, приводит к гибели водных экосистем и уничтожению водных биологических ресурсов. В ряде стран инвазия этих видов стала причиной гуманитарных катастроф. Согласно действующему законодательству Российской Федерации, подобные события должны рассматриваться как чрезвычайные ситуации регионального и межрегионального масштабов. Особую опасность представляет инвазия водного гиацинта и других указанных видов в водоемы-охладители АЭС. Их массовое развитие неизбежно приведет к снижению

INVASIONS OF THERMOPHILIC AQUATIC VEGETATION AS A THREAT OF AN EMERGENCY SITUATION AT NUCLEAR POWER FACILITIES

Viktor N. Beznosov[1], Antonina L. Suzdaleva[2]

[1]Scientific and Industrial Research Association "Gidrotehproekt", Valday, Russia;
[2]National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow Russian Federation
SuzdalevaAL@yandex.ru

Abstract. At present, there is a high risk of invasion of a number of types of thermophilic floating vegetation into the nuclear power plant cooling pond. The greatest dangers are water hyacinth, water lettuce and giant salvinia. The massive development of these plants in water bodies of many countries has already caused catastrophic consequences. They are included in the international and national lists of the most dangerous aquatic weeds. As a result of rapid reproduction these species are able to cover the entire surface of the water body in a short time. This creates serious biological interference in the operation of water supply systems, hinders navigation, leads to the destruction of aquatic ecosystems. According to the current legislation of the Russian Federation, such events should be considered as emergencies of regional and interregional scale. Particularly dangerous is the invasion of water hyacinth and other above-mentioned species into the NPP cooling pond. Their massive development will inevitably lead to a decrease in heat transfer at the water-air border, as well as clogging of water intake grids and filters. This will create a risk of an accident as a result of overheating of power units. Under the existing conditions, it is almost impossible to prevent the invasion of floating vegetations into NPP cooling ponds. The real way to prevent an emergency

Beznosov V.N., Suzdaleva A.L. Invasions of thermophilic aquatic vegetation as a threat of an emergency situation at nuclear power facilities. *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2023, vol. 5, iss. 3, pp. 264–277. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2023.5.3.264.

теплопередачи на границе вода-воздух, а также засорению водозаборных решеток и фильтров. В результате к теплообменникам АЭС начнет поступать вода с более высокой температурой, а ее объем сокращается. Это создает риск аварии в результате перегрева энергетических агрегатов. Высокому риску инвазии плавающих водных сорняков способствуют многочисленные попытки использовать их для биологической очистки вод. Кроме того, они культивируются как декоративные растения в аквариумах и бассейнах. В существующих условиях предотвратить инвазию в водоемы-охладители опасных для эксплуатации АЭС плавающих растений практически невозможно. Действенным путем предотвращения таких чрезвычайных ситуаций является организация мониторинга, а также превентивная разработка средств химической борьбы и механического уничтожения плавающей растительности.

Ключевые слова: водоем-охладитель АЭС; биопомехи; водный гиацинт; пистия; гигантская сальвиния.

situation is the arrangement of monitoring, as well as the preventive development of chemical control means and mechanical destruction of floating vegetation.

Keywords: NPP cooling pond; biological interference; water hyacinth; water lettuce; giant salvinia.

Введение

В настоящее время наблюдается расширение ареалов ряда тропических плавающих водных растений, вселение (инвазия) которых в новые области создает большие проблемы [Abonyo, Howard, 2012; Patra, 2013; Admas et al., 2017; Harun et al., 2021; Martinez Jimenez, Gomez Balandra, 2022]. Наиболее катастрофичные последствия имеет инвазия таких видов как водный гиацинт (эйхорния), пистия и гигантская сальвиния. Стремительное массовое развитие этих видов вызывает нарушение работы систем водоснабжения, ирригации и объектов гидроэнергетики. Становится невозможным использование водных объектов для судоходства, рыбоводства и рыболовства. В ряде случаев происходит катастрофическое ухудшение жизни населения, требующее принятие экстренных мер. Например, в Судане инцидент инвазии водного гиацинта имел такие последствия для местного населения, что потребовалось привлечение гуманитарной помощи ООН. Помимо прочего, массовое размножение видов-вселенцев (инвайдеров) приводит к уничтожению естественных водных экосистем. В действующем законодательстве РФ подобные события квалифицируются как чрезвычайные ситуации (ЧС) регионального и межрегионального масштабов. Их можно рассматривать как один видов биосоциальных ЧС [Суздалева, 2022].

Особую опасность в России представляют вспышки развития свободно плавающих тропических растений (водного гиацинта, пистии и гигантской сальвинии) в районах размещения объектов атомной энергетики. Данные виды в настоящее время широко распространились в Европе и даже встречаются в некоторых водных объектах Российской Федерации.

На большинстве российских атомных электростанций (АЭС) используются оборотные системы технического водоснабжения (СТВ) открытого типа, включающие так называемые водоемы-охладители. Они представляет собой видоизмененные озера или водохранилища, значительная часть объема которых вовлекается в

циркуляционное течение. Формирующее его воды, нагретые при прохождении через теплообменники АЭС, двигаясь к водозабору электростанции, постепенно снижают свою температуру и становятся пригодными для повторного использования. Недостаточный уровень охлаждения вод или сокращение объема их подачи к теплообменной аппаратуре при массовом развитии в водоемах-охладителях свободно плавающей водной растительности создает угрозу аварии [Горюнова и др., 2002]. Аналогичные ЧС в других регионах мира не наблюдались только по причине использования систем охлаждения другого типа (СТВ закрытого типа с градирнями, охлаждение морскими водами). Инвазии теплолюбивых видов в водоемы-охладители способствует постоянно повышенная температура воды таких водоемов [Суздалева и др., 2015]. Случаи массового развития в этих водных объектах экзотических форм растений и животных уже неоднократно отмечались ранее [Безносов, Суздалева, 2001].

Следует отметить, что аналогичные события могут произойти и на тепловых электростанциях с оборотной системой технического водоснабжения открытого типа, а также на прудах-охладителях крупных промышленных объектов, примером которых может служить пруд-охладитель Магнитогорского металлургического комбината [Любимова и др., 2020].

Исключить вселение тропических видов свободно плавающей растительности в водоемы-охладители невозможно. Своевременное обнаружение инвайдеров, позволяющее принять меры по недопущению их массового развития, представляет собой вполне реальную задачу. Необходимым условием является понимание опасности нарушения работы АЭС из-за возникновения биопомех, которые могут вызвать эти растения. Специалисты, занимающиеся эксплуатацией водоемов-охладителей, должны располагать информацией, позволяющей идентифицировать подобные виды.

Опасные растительные инвайдеры

Наиболее высокий риск возникновения ЧС, обусловленной биопомехами в работе СТВ АЭС, создает угроза проникновения в водоемы-охладители водного гиацинта или эйхорнии толстоножковой *(Eichhornia crassipes (Mart.) Solms.)*. Это растение выглядит как плавающая на поверхности воды розетка из мясистых округлых листьев, диаметр которой обычно составляет несколько десятков сантиметров (рисунок 1). В ее центре находится соцветие голубой или фиолетовой окраски. Эйхорния размножается как семенами, так вегетативным путем, образуя отпочковывающиеся отростки. В результате каждые 11–18 суток может происходить удвоение численности растений, и в течение непродолжительного времени на поверхности воды возникает сплошной ковер эйхорнии, иногда достигающий плотности, позволяющий выдерживать вес человека (рисунок 2). Оптимальной для развития данного вида является температура 28–30 °С, при 10 °С рост растений прекращается [Gopal, 1987]. Понижение температуры до 5 °С вызывает гибель эйхорнии [Owens, Madsen, 1995].



Рисунок 1. Водный гиацинт (*Eichhornia crassipes*), общий вид молодого растения (https://apps.lucidcentral.org/pppw_v10/text/web_mini/entities/water_hyacinth_455.htm)
Figure 1. Water hyacinth (*Eichhornia crassipes*), general view of a young plant

Естественным ареалом водного гиацинта является бассейн р. Амазонка, но в XIX–XX веках данный вид широко распространился в Северной и Южной Америке, Африке, Азии, Австралии и Европе в водных объектах с подходящими для него температурными условиями [Gopal, 1987; Basu et al., 2021]. В настоящее время эйхорния отмечена в ряде регионов юга России [Литвинская, Савченко, 2016] и в центральных ее областях на участках сброса подогретых вод [Щербаков, Майоров, 2013].



Рисунок 2. Поверхность водного объекта, покрытая сплошным «ковром» водного гиацинта *(Eichhornia crassipes)* (https://xentaika.ru/vodyanoy-giacint-ili-eyhorniya-tolstonojkovaya-xl-xf0g3oY8JBuUEt0mn4t-vi.html)

Figure 2. The surface of a water body covered with a continuous “carpet” of Water hyacinth *(Eichhornia crassipes)*

Инвазия и последующее массовое развитие водного гиацинта неоднократно приводили к катастрофическим последствиям во многих странах по причине блокировки работы водозаборов, ирригационных и дренажных систем, нарушения работы гидроагрегатов электростанций [Tellez et al., 2008; Coetzee et al., 2009]. Известны случаи, когда развитие эйхорнии приводило к остановке судоходства и даже становилось причиной наводнений в результате закупорки русел водотоков. Заражение водоемов водным гиацинтом также практически всегда приводит к деградации их экосистем и утрате запасов водных биологических ресурсов [Villamagna, Murphy, 2010; Degaga, 2018]. В районах, где основным занятием является рыболовство, это иногда становится причиной вынужденной миграции населения.

Большую опасность представляет и инвазия в водоемы-охладители другого крупного плавающего растения – пистии телорезовидной *(Pistia stratiotes L.)*. На протяжении XX века данный вид распространился из тропической зоны Африки на другие континенты [Martinez Jimenez, Gomez Balandra, 2022], в частности в Европу [Шаповалов, Сапрыкин, 2016]. В конце XX – начале XXI века пистия отмечена на ряде водоемов юга России [Литвинская, Савченко, 2016], а также в ее центральных областях на участках сброса подогретых вод, например, в Московском регионе [Щербаков, Майоров, 2013; Таллер и др., 2021].



Рисунок 3. Скопления пистии, дрейфующие по реке Северный Донец (http://paranormal-news.ru/news/ ukrainskuju_reku_okkupiroval_tropicheskij_sornjak/2013-07-13-7280)

Figure 3 Water lettuce (*Pistia stratiotes*) accumulations drifting along the Northern Donets River

Листья пистии, длина которых может достигать 30 см, образуют плотную розетку. При интенсивном вегетативном размножении вся поверхность водного объекта может быть покрыта сплошным слоем этого растения (рисунок 3). Оптимальной для пистии является температура воды 25 °С. Вселение в водные системы данного вида и последующее его развитие создает серьезные биопомехи и вызывает деградацию водных экосистем.

Аналогичные явления происходят при инвазии в водные объекты плавающего папоротника – гигантской сальвинии (*Salvinia molesta D.S. Mitch*). Латинское название данного вида переводится как Сальвиния назойливая, но оно практически не используется. Распространившееся в научной литературе название гигантская сальвиния (*giant salvinia*) объясняется тем, что другие растения этого же рода значительно уступают ей в размерах. Длина ее стебля, от которого отходят округлые листья, составляет всего несколько сантиметров (рисунок 4). При благоприятных условиях биомасса сальвинии на протяжении двух суток может увеличиться приблизительно в 2 раза [Mitchell, Tur, 1975; Barrett, 1981]. За несколько недель растения этого вида могут образовать на поверхности водоема сплошной покров

толщиной до 1 м [Thomas, Room, 1986]. Во многих случаях подобные явления рассматриваются как бедствия, сопровождающиеся значительным экономическим и экологическим ущербом. Родиной гигантской сальвинии является Бразилия. Этот вид из-за деятельности человека, сначала проник в Северную Америку, Австралию, Африку и Юго-Восточную Азию, а затем и в водоемы ряда стран Южной и Центральной Европы [Coetzee, Hill, 2020]. Наиболее высокие темпы развития сальвинии наблюдаются при 30 °С. При снижении температуры воды до 10 °С ее рост останавливается.



Рисунок 4. Отдельный экземпляр гигантской сальвинии (*Salvinia molesta*) (https://id-live-02.slatic.net/p/658ddb541dca819c83b39fcefb24f1f1.jpg_1200x1200q80.jpg)

Figure 4. Individual specimen of giant salvinia (*Salvinia molesta*)

Основные механизмы инвазии

Общей чертой описанных видов водной растительности является то, что в течение XX-XXI веков они заселили новые обширные регионы, находящиеся на огромном расстоянии от границ их естественного ареала. Эйхорния и сальвиния преодолели океаны, проникнув из Южной Америки в Евразию. Это стало возможным только в результате человеческой деятельности, из-за которой возникли два основных механизма инвазии:

1. Культивирование в качестве декоративных растений. Все три вида выращиваются в аквариумах. Водный гиацинт и пистия также используются для украшения прудов и бассейнов [Labrada, Fornasari, 2002]. С этой целью в течении многих десятилетий данные виды перемещались по всем континентам. Всегда существовала высокая вероятность их попадания во внешнюю среду, например, при очистке аквариума или бассейна [Афанасьев, 2008; Щербаков, Майоров, 2013; Koncki, Aronson, 2015; Литвинская, Савченко 2016]. Поскольку эти виды способны к интенсивному вегетативному размножению, то для их массового развития в водном объекте достаточно одного растения.

2. Использование для биологической очистки вод и в качестве растительного сырья. Высокие темпы роста эйхорнии, пистии и сальвинии, а также относительная легкость извлечения массы плавающих растений из воды обусловливают их привлекательность для фиторемедиации, т.е. очистки воды путем аккумуляции загрязнителей в растениях [Victor et al., 2016; Saha et al., 2018; Basu et al., 2021]. В связи с этим неоднократно предлагалось интродуцировать эти виды в регионах, в которых они ранее не встречались. Высказывались также предложения использовать водный гиацинт как сырье для получения биотоплива [Gandhimathi, 2017; Martinez Jimenez, Gomez Balandra, 2022], органических удобрений [Ogutu, 2019] и корма для скота [Indulekha et al., 2019]. Аналогичное цели могут быть достигнуты и с использованием других видов опасной водной растительности. Эта деятельность может принести ощутимую экономическую выгоду, но неизбежно сопряжена с высоким риском неконтролируемой инвазии, например, при транспортировке растительной массы на объекты по ее переработке.

Рассматривая проблему инвазии плавающих теплолюбивых водных растений, следует обратить внимание на существенное различие в отношении к ней со стороны современных зарубежных и отечественных специалистов. В странах, где последствия массового развития в водоемах эйхорнии, пистии и гигантской сальвинии уже проявились в полной мере, основная часть посвященных им публикаций касается проблем борьбы с данными видами и контроля за их дальнейшим распространением. На национальном и международном уровнях они внесены в перечни наиболее опасных инвайдеров [Holm et al., 1977;

Labrada, Fornasari, 2002; Koutika, Rainey, 2015; Yan, Guo, 2017].

В России, напротив, широко обсуждается перспективность интродукции данных видов для биологической очистки водных объектов. Осуществляются попытки практической реализации данной идеи: например, разведение водного гиацинта в Москве-реке [Лагутин, Ханбабаева, 2019]. Один из авторов статьи в конце 80-х гг. XX в. был свидетелем попытки (к счастью, неудачной) вселения водного гиацинта в водоем-охладитель Курской АЭС (Курчатовское водохранилище) с целью улучшения качества его вод. Таким образом, целенаправленное распространение этих растений дополняет уже существующий высокий риск их инвазии при непреднамеренном заносе в водные объекты. Опасность распространения плавающих растений, создающих серьезные биопомехи при осуществлении подобных проектов интродукции, полностью игнорируется, как и необходимость разработки мер по контролю за их попаданием во внешнюю среду. В отличие от зарубежных стран, эйхорния, пистия и гигантская сальвиния не внесены в перечни опасных инвазионных видов России [Дгебуадзе и др., 2018].

Все это создает высокий риск проникновения этих проявляющих высокую инвазионную способность видов в водоемы-охладители, в которых существуют благоприятные условия для их массового развития. В сложившихся условиях возникновение ЧС, обусловленных нарушением работы СТВ АЭС, практически неизбежно.

Сценарий развития ЧС

Любая ЧС представляет собой цепь событий, объединенных причинно-следственными связями. Каждое событие может рассматриваться как ее отдельная стадия, на которой меры по предотвращению и минимизации нежелательных явлений (воздействий поражающих факторов и их последствий) имеют свою специфику. Подобные стадии можно выделить и в развитии чрезвычайной ситуации на водоеме-охладителе АЭС, вызванной вспышкой размножения опасных растительных инвайдеров (таблица 1).

Таблица 1. Стадии развития ЧС и меры по минимизации негативных воздействий на работу СТВ АЭС
Table 1. The stages of emergency situation development and measures to minimize negative impacts on the operation of nuclear power plant technical water supply systems

Стадия	Процессы и явления, создающие угрозу работе СТВ АЭС	Меры по минимизации негативных явлений
Зарождение	Формирование благоприятных условий для развития инвайдеров	Организация мониторинга водной растительности
Инициирование	Появление в прибрежной зоне отдельных скоплений инвайдеров	Оперативное уничтожение подобных скоплений
Воздействие первичных факторов	Снижение теплообмена на границе вода-воздух, ограничение подачи воды к теплообменникам	Очистка в авральном режиме решеток и фильтров
Воздействие вторичных факторов	Биопомехи, обусловленные жизнедеятельностью инвайдеров	Борьба с возникшими биопомехами
Затухание	Разложение массы отмершей растительности, ухудшающее качество воды	Уничтожение инвайдеров на участках подогрева вод, ликвидация скоплений некромассы
Ликвидация	Периодически возникающие вспышки развития инвайдеров	Уничтожение растений механическими и химическими средствами

Стадия зарождения – это создание предпосылок для возникновения ЧС. Для рассматриваемых событий подобного рода предпосылки уже существуют на всех водоемах-охладителях. Прежде всего это постоянный подогрев воды на значительной части акватории. Важным условием массового развития всех трех видов является высокий уровень эвтрофирования вод, т.е. присутствие в них значительного количества так называемых биогенных элементов, необходимых для роста растений, главным образом в форме неорганических

соединений азота и фосфатов. Рассматривая этот вопрос, следует отметить, что все российские водоемы-охладители подвержены не только интенсивному химическому эвтрофированию, в результате поступления в них этих веществ с различными хозяйственно-бытовыми стоками и водами поверхностного стока с окружающей территории [Суздалева и др., 2013]. В них наблюдаются процессы термического эвтрофирования, заключающиеся в интенсивном разложении азот- и фосфорсодержащих субстратов (донных отложений, растительных остатков) при повышенной температуре воды [Безносов и др., 2002]. В сложившихся условиях представляется целесообразной организация в теплое время года мониторинга растительности водоемов-охладителей. Это дает возможность своевременно зафиксировать появление первых особей инвайдеров, а также установить их источник.

Стадия инициирования заключается в появлении на отдельных участках прибрежной зоны водоема-охладителя локальных скоплений инвайдеров. Для них, как и для других плавающих растений, необходимым условием интенсивного вегетативного размножения является слабая подвижность вод. На участках с течением они появляются позже, когда поверхность застойных зон уже полностью заполнена. На данной стадии дальнейшее развитие инвазии может быть прекращено оперативным уничтожением обнаруженных скоплений чужеродной растительности. Кроме того, необходимо отслеживание их повторного появления.

Стадией воздействия первичных факторов ЧС следует считать неожиданное массовое появление плавающих растений в циркуляционном течении. Наиболее вероятным временем наступления этой стадии в умеренной зоне России является начало лета. К этому времени при отсутствии своевременного обнаружения и ликвидации локальных скоплений растений-инвайдеров в прибрежной зоне в результате интенсивного вегетативного размножения все большее количество их особей будет выноситься в циркуляционное течение. Часто это происходит в форме выноса «островов» из плавающей растительности, площадь которых может достигать сотен квадратных метров (см. рисунок 3).

Первичным фактором воздействия также можно считать неизбежно возникающую на данной стадии развития ЧС угрозу сокращения объема воды, подаваемой к теплообменникам. Это особенно опасно, поскольку при развитии инвайдеров на поверхности циркуляционного течения на водозабор поступает вода с более высокой температурой. В этих условиях, для обеспечения нормальной работы теплообменников, потребуется значительно больший объем воды. Как свидетельствуют материалы, полученные при исследовании различных водных объектов, присутствие большого количества плавающих растений вызывает значительное снижение скорости течения. Замедлению передвижения вод по акватории водоема-охладителя также будет способствовать необходимость профилактической остановки энергоблоков для очистки решеток водозабора и фильтров от огромного количества плавающих растительных фрагментов. В свою очередь замедление течения в центральной части водоема-охладителя создаст более благоприятные условия для размножения плавающих растений и в этой части акватории, что приведет к дальнейшему снижению объема воды, поступающей к водозабору АЭС.

Уничтожение плавающих растений во время вспышки их массового развития на поверхности циркуляционного течения требует применения специальной техники и средств. Поэтому основной мерой на данной стадии является периодическая очистка решеток и фильтров. Данную стадию, на которой борьба с развитием инвайдеров ведется в авральном режиме, можно считать ***кульминационной***, во время которой риск аварии на АЭС вследствие нарушения работы теплообменной аппаратуры наиболее высок. Опасность подобного события повышается также по причине того, что в летний период, когда скорость вегетации плавающих растений наиболее велика, уровень охлаждения вод в силу высокой температуры воздуха падает до минимума. Таким образом, именно в этот период формируется комплекс условий, способный вызвать критический перегрев оборудования в результате недостаточно

охлаждения циркулирующих вод и сокращения объема их подачи.

Стадия воздействия вторичных факторов главным образом обусловлена последствиями жизнедеятельности растений и их отмиранием. Интенсивный фотосинтез водных растений сопровождается подщелачиванием среды, что резко интенсифицирует процесс образования твердых отложений (накипи) на поверхности теплообменников [Суздалева и др., 2004). Интенсивному развитию плавающих растений обычно сопутствует отмирание их отдельных частей. Их разложение обогащает воду взвешенным и растворенным органическим веществом. Мелкие частицы отмерших растений являются основной пищей обитающих во внутренних частях СТВ организмов-обрастателей (дрейссены, мшанок, гидроидов), массовое развитие которых также может обусловить биопомехи, создающие угрозу аварийной ситуации. Высокое содержание растворенного органического вещества стимулирует развитие на поверхности контактирующего с водой оборудования бактериальной слизи (биопленки). Данный фактор также весьма важен. Биопленка на теплообменниках толщиной всего 0,1 мм может снизить теплопередачу более чем в 4 раза [Лудянский, Выскребец, 1981].

Плавающие растения в процессе жизнедеятельности испаряют со своей поверхности большое количество влаги. При покрытии ими значительной части поверхности водного объекта потери за счет испарения возрастают многократно [Abonyo, Howard, 2012; Basu et al., 2021]. В ряде случаев это может вызвать дефицит воды в регионе [Benton et al., 1978]. Аналогичные явления ожидаемы и в водоемах-охладителях, что потребует увеличения их дополнительной подпитки.

На стадии воздействия вторичных факторов происходит не только повышение риска аварии в СТВ АЭС за счет развития дополнительных видов биопомех, но и появление угроз санитарно-эпидемиологического характера. Распространению водного гиацинта нередко сопутствует появление в регионе новых опасных заболеваний, для переносчиков которых формирование зарослей этого растения создает благоприятные условия (ссылка). Это обусловливает необходимость расширения спектра действий по минимизации опасных процессов и явлений.

Развитие теплолюбивых инвайдеров в умеренной зоне носит сезонный характер. В холодное время года эти растения могут вегетировать только непосредственно на участке сброса подогретых вод. Поэтому интенсивность воздействия первичных факторов осенью неизбежно снизится. Данный период можно назвать ***стадией затухания***. Но в то же время это ни в коей мере не следует рассматривать как самоликвидацию ЧС в силу естественных причин. Без принятия специальных мер даже весьма небольшое количество растений, перезимовавших в наиболее обогреваемой зоне водоема-охладителя, с наступлением весны обеспечит новую вспышку массового развития. Кроме того, отмирание плавающих растений и разложение образующейся некромассы (скоплений растительных остатков) обусловит интенсивное воздействие ряда вторичных факторов и в осенне-зимний период. Следовательно, основными мерами на стадии затухания должны стать уничтожение теплолюбивых растений на участках сброса вод. Можно также ожидать, что большая масса отмерших растений будет накапливаться в прибрежной зоне, создавая опасные источники вторичного загрязнения вод, что может стимулировать возникновение серьезных биопомех во внутренних узлах СТВ АЭС [Суздалева и др., 2004]. Подобные явления наблюдались, например, на водоеме-охладителе Курской АЭС, после вспышки его зарастания в 2004–2005 гг. [Безносов и др., 2006]. Разложение прибрежных валов из отмершей растительности, мощность которых местами превышала 1 м, вызвало резкое ухудшение качеств воды на обширных участках акватории и массовую гибель водных организмов. Подобные скопления некромассы необходимо оперативно убирать из прибрежной зоны.

Без осуществления специальных мер вспышки развития плавающих растений-инвайдеров будут периодически повторяться. Избежать этого можно только на основе комплекса мероприятий, проведение которых следует обозначить как ***стадию ликвидации***. Основной целью на этой стадии является недопущение развития опасных инвайдеров.

Выполнение этой задачи может быть осуществлено на различных стадиях развития ЧС. Оптимальным вариантом является уничтожение чужеродных растений при их появлении, т.е. на стадии инициирования ЧС. Но протяженность береговой линии водоемов-охладителей АЭС обычно составляет несколько десятков километров, а количество источников, из которых может произойти вселение чужеродных видов, весьма велико, и большинство из них контролировать невозможно (например, любительские аквариумы). Таким образом, необходимым является мониторинг инвайдеров. Установление факта инвазии, даже если все появившиеся в водоеме растения удалось уничтожить, служит сигналом для оперативной подготовки мер по предотвращению их массового развития.

Способы борьбы с распространением инвайдеров

Существуют различные способы борьбы с рассматриваемыми видами плавающих растений, включая биологические [Coetzee et al., 2009]. Они опробованы во многих странах, но ни в одном случае не привели к полному исчезновению инвайдеров. Вместе с тем, их применение позволило значительно снизить негативные последствия массового развития плавающих растений. Большую эффективность показывают механические и химические методы борьбы. В первом случае используются специальные технические средства, предназначенные для сбора фитомассы с поверхности воды, во втором случае водные объекты обрабатываются гербицидами. Оба эти способа к настоящему времени еще недостаточно разработаны, и их совершенствование представляет весьма актуальную задачу. Необходимо отметить, что механические и химические меры борьбы с плавающими водными сорняками являются эффективными только при периодическом повторении. Это связано с тем, что даже после полного уничтожения этих видов в конкретном водном объекте через непродолжительное время может произойти их повторная инвазия. Данные растения могут длительное время сохраняться в виде семян и спор. Семена водного гиацинта сохраняют свою жизнеспособность в донных отложениях на протяжении 20 лет [Gopal, 1987]. Поэтому на АЭС и других предприятиях, для которых вселение в источники технического водоснабжения тропических плавающих растений может создать аварийную ситуацию, целесообразно в превентивном порядке подготовить технические и химические средства борьбы с инвайдерами, а также обучить персонал использовать их. Задача ликвидации биологических ЧС подобного характера на территории РФ в определенной мере облегчается тем, что время наступления этих событий можно прогнозировать на основе динамики термического режима водного объекта, т.е. установления момента времени, когда температура воды на значительной части акватории достигнет уровня, благоприятного для размножения инвайдеров.

Выводы

1. В ближайшее время следует ожидать появление в водоемах-охладителях АЭС, расположенных в умеренной зоне России, тропических видов плавающей водной растительности, массовое развитие которых способно создать угрозу возникновения чрезвычайной ситуации, обусловленной нарушением работы систем технического водоснабжения.

2. Для своевременного установления факта инвазии опасных видов растений в весенне-летний период следует организовать ежегодное проведение мониторинга водной растительности водоемов-охладителей.

3. Необходимо создать специальные плавсредства, способные осуществлять механическую очистку поверхности воды от плавающей растительности.

4. Поскольку применяемые в настоящее время для борьбы с водным гиацинтом химические средства не дают удовлетворительного эффекта, а их приобретение в зарубежных странах потенциально сопряжено с определенными трудностями, представляется целесообразным своевременно привлечь к решению данной проблемы отечественных специалистов.

5. Для придания системного характера деятельности по борьбе с инвазиями в водоемы-охладители следует разработать нормативные документы, регламентирующие порядок

предпринимаемых действий и привлекаемые для их осуществления ресурсы. Важным является своевременное согласование планируемых мер борьбы с опасными растениями в органах исполнительной власти, осуществляющих надзор в сфере охраны окружающей среды.

Литература

Афанасьев В.Е. Анализ мест натурализации адвентивных растений в Астраханской области // Вестник АГТУ. 2008. №6(47). С. 238–241.

Безносов В.Н., Кучкина М.А. Суздалева А.Л. Исследование процесса термического евтрофирования в водоемах-охладителях АЭС // Водные ресурсы. 2002. Т. 29. №5. С. 610–615.

Безносов В.Н., Суздалева А.Л. Экзотические виды фитобентоса и зообентоса водоемов-охладителей АЭС как биоиндикаторы теплового загрязнения // Вестник МГУ. Серия 16 Биология. 2001. №3. С. 27–31.

Горюнова С.В., Попов А.В., Суздалева А.Л. Безносов В.Н. Чрезвычайные экологические и биологические ситуации в техногенных водных экосистемах // Вестник Российского ун-та дружбы народов. Сер. Сельскохозяйственные науки. 2002. №8. С. 10–16.

Лагутин А.А., Ханбабаева О.Е. Фиторемедиационные свойства водного гиацинта (Eichhornia crassipes (Mart.) Solms) // Вестник ландшафтной архитектуры. 2019. №18. С. 52–57.

Литвинская С.А., Савченко М.Ю. К вопросу об инвазивности флоры Западного Кавказа // Ботанический вестник Северного Кавказа. 2016. №1. С. 23–35.

Лудянский М.Л., Выскребец А.М. Методы борьбы с биологическими обрастаниями в системе водоснабжения металлургического предприятия. // Промышленная. энергетика. 1981. №11. С.34–36.

Любимова Т.П., Паршакова Я.Н., Лепихин А.П., Ляхин Ю.С. Повышение устойчивости функционирования водоемов-охладителей за счет использования схем селективного забора воды // Вода и экология: проблемы и решения. 2020. №2(82). С. 45–58. DOI: 10.23968/2305-3488.2020.25.2.45-58.

Процесс вторичного загрязнения водоема: основные фазы и мероприятия по предотвращению нежелательных экологических последствий / *Безносов В.Н., Горюнова С.В., Кучкина М.А., Попов А.В., Суздалева А.А.* // Вестник Московского государственного

References

Abonyo E., Howard G. *Guide to some invasive plants affecting Lake Tanganyika.* Nairobi: IUCN ISI and Lake Tanganyika Authority, 2012.64 p.

Admas A, Sahle S, Belete E, Agidie A, Alebachew M. Controlling Water Hyacinth in Lake Tana Using Biological Method at Green House and Pond Level. Eur. Exp. Biol., 2017, vol. 7, no. 5(30), pp. 1–10. DOI: 10.21767/2248-9215.100001.

Afanasiev V.E. The analysis of naturalization places of adventitious plants in the astrakhan region. *Vestnik of Astrakhan State Technical University*, 2008, no 6(47), pp. 238–241. (In Russian).

Barrett S.C.H. Waterweed Invasions. *Scientific American*, 1989, vol. 264, no. 4, pp. 90–97.

Basu A., Hazra A.K., Chaudhury S., Ross A.B., Balachandran S. State of the Art Research on Sustainable Use of Water Hyacinth: A Bibliometric and Text Mining Analysis. *Informatics*, 2021, vol. 8(38), pp. 1–14. DOI: 10.3390/ informatics8020038.

Benton A.R., James W.P., Rouse J.W. Evapotranspiration from water hyacinth (Eichhomia crassipes (Mart.) Solms) in Texas reservoirs. *J. Am. Water Resour. Assoc*, 1978, vol. 14, no. 4, pp. 919–930. DOI: 10.1111/j.1752-1688.1978.tb05588.x.

Beznosov V.N., Kuchkina M.A., Suzdaleva A.L. Studying thermal eutrophication in cooling reservoirs of nuclear power plants. *Water resources*, 2002, vol. 29, no. 5, pp. 610–615. (In Russian; abstract in English).

Beznosov V.N., Suzdaleva A.L. Exotic species of the phytobenthos and the zoobenthos living into cooling reservoirs of nuclear power plants as a bioindicators of the thermal pollution. *Herald of Moscow University. Series 16. Biology*, 2001, no. 3, pp. 27–31.

Coetzee J.A., Hill M.P. Salvinia molesta D. Mitch. (Salviniaceae): impact and control. *CAB Reviews*, 2020, vol. 15, no. 33, pp. 1–11. DOI: 10.1079/PAVSNNR202015033.

Degaga A.H. Water hyacinth (Eichhornia crassipes) biology and its impact on ecosystem, biodiversity,

областного университета. Серия: «Естественные науки». 2006. №3. С. 84–87.

Самые опасные инвазионные виды России (ТОП-100) / *Ред. Дгебуадзе Ю.Ю. Петросян В.Г. Хляп Л.А.* М.: Т-во научных изданий КМК, 2018. 688 с.

Суздалева А.Л., Безносов В.Н., Горюнова С.В. Биологические инвазии в природно-технических системах // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия экология и безопасность жизнедеятельности. 2015. №3. С. 67–78.

Суздалева А.Л., Безносов В.Н., Кучкина М.А. Экологический механизм эвтрофирования водоема-охладителя АЭС // Безопасность энергетических сооружений. М.: Изд. НИИЭС, 2013. Т. 18. С. 158–177.

Суздалева А.Л., Безносов В.Н., Кучкина М.А. Экологический мониторинг водных объектов и экоаудит водопользователей как основа борьбы с биопомехами в системах техводоснабжения // Безопасность энергетических сооружений. М.: Изд. НИИЭС, 2004. Т. 14. С.189–206.

Суздалева А.Л. Биолого-социальные чрезвычайные ситуации // Естественные и технические науки. 2022. №8(171). С.114–115.

Таллер Е.Б., Командирова А.В., Рамадан Р. Адвентивный вид Pistia stratiotes L. (Araceae) в водоемах Москвы // Доклады ТСХА. 2021. Т. 293. Ч.4. С. 437–439.

Шаповалов М.И., Сапрыкин М.А. Чужеродный вид Pistia stratiotes L. (Araceae) в водоёмах урбанизированной территории юга России // Российский журнал биологических инвазий. 2016. №1. С. 139–146.

Щербаков А.В., Майоров С.Р. Водные адвентивные растения московского региона // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о земле. 2013. №2. С. 57–61.

Abonyo E., Howard G. Guide to some invasive plants affecting Lake Tanganyika. Nairobi: IUCN ISI and Lake Tanganyika Authority, 2012. 64 p.

Barrett S.C.H. Waterweed Invasions // Scientific American. 1989. Vol. 264. No.4. P. 90–97.

Basu A., Hazra A.K., Chaudhury S., Ross A.B., Balachandran S. State of the Art Research on Sustainable Use of Water Hyacinth: A Bibliometric and Text Mining Analysis. Informatics. 2021. Vol. 8(38). P. 1–14. DOI: 10.3390/ informatics8020038.

economy and human well-being. *Jurnal of Life Science and Biomedicine,* 2018, vol. 8, no. 6, pp. 94–100.

Eicchornia crassipes (Mart.) Solms-Laub. (Pontederiaceae) /Coetzee J.A., Hill M.P., Julien M.H., Center T.D., Cordo H.A. *Biological Control of Tropical Weeds using Arthropods*. Publ. online by Cambridge University Press, 2009, pp. 181–208. DOI:10.1017/CBO9780511576348.011.

Gandhimathi A. Enhanced biofuel production from water hyacinth. *Ecology, Environment and Conservation Paper,* 2017, vol. 23, no. 3, pp. 1586–1590.

Gopal B. *Water Hyacinth*. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1987. 477 p.

Goryunova S.V., Popov A.V., Suzdaleva A.L., Beznosov V.N. Extreme ecological and biological situations in technogenic hydro ecosystems. *Bulletin of Peoples' Friendship University, series Ecology and life safety*, 2002, no. 8, pp. 10–16. (In Russian; abstract in English).

Harun I., Pushiri H., Amirul-Aiman A.J., Zulkeflee Z. Invasive Water Hyacinth: Ecology, Impacts and Prospects for the Rural Economy. *Plants*, 2021, vol. 10, 1613, pp. 1–23. DOI:10.3390/ plants10081613.

Holm L.G., Plucknett D.L., Pancho J.V., Herbeger J.P. *World's worst weeds. Distribution and biology*. Honolulu: University of Hawaii, 1977. 609p.

Indulekha V.P., Thomas C.G., Anil K.S. Utilization of water hyacinth as livestock feed by ensiling with additives. *Indian Journal of Weed Science*, 2019, vol. 51, no. 1, pp. 67–71.

Koncki N.G., Aronson M.F.J. Invasion Risk in a Warmer World: Modeling Range Expansion and Habitat Preferences of Three Nonnative Aquatic Invasive Plants. *Invasive Plant Science and Management,* 2015, no. 8, pp. 1–15. DOI: 10.1614/IPSM-D-15-00020.1.

Koutika L-S., Rainey H.J. A Review of the invasive, biological and beneficial characteristics of aquatic species Eichhornia crassipes and Salvinia molesta. *Applied ecology and environmental research*, 2015, vol. 13, no. 1, pp. 63–275. DOI: 10.15666/aeer/1301_263275.

Labrada R., Fornasari L. *Management of problematic aquatic weeds in Africa FAO efforts and achievements during the period 1991-2001*. Rome:

Benton A.R., James W.P., Rouse J.W. Evapotranspiration from water hyacinth (Eichhomia crassipes (Mart.) Solms) in Texas reservoirs // J. Am. Water Resour. Assoc. 1978. Vol. 14. No.4. P. 919–930. DOI: 10.1111/j.1752-1688.1978./tb05588.x.

Coetzee J.A., Hill M.P. Salvinia molesta D. Mitch. (Salviniaceae): impact and control // CAB Reviews. 2020. Vol. 15. No.033. P. 1–11. DOI: 10.1079/PAVSNNR202015033.

Controlling Water Hyacinth in Lake Tana Using Biological Method at Green House and Pond Level / *Admas A. Sahle S. Belete E. Agidie A. Alebachew M.* // Eur. Exp. Biol. 2017. Vol. 7. No.5(30). P. 1–10. DOI: 10.21767/2248-9215.100001.

Degaga A.H. Water hyacinth (Eichhornia crassipes) biology and its impact on ecosystem, biodiversity, economy and human well-being // Jurnal of Life Science and Biomedicine 2018. Vol. 8. No.6. P. 94–100.

Eicchornia crassipes (Mart.) Solms-Laub. (Pontederiaceae) / *Coetzee J.A., Hill M.P., Julien M.H., Center T.D., Cordo H.A.* // Biological Control of Tropical Weeds using Arthropods. Published online by Cambridge University Press. 2009. P. 181–208. DOI:10.1017/CBO9780511576348.011.

Gandhimathi A. Enhanced biofuel production from water hyacinth. Ecology, Environment and Conservation Paper. 2017. Vol. 23. No.3. P. 1586–1590.

Gopal B. Water Hyacinth. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1987. 477 p.

Harun I., Pushiri H., Amirul-Aiman A.J., Zulkeflee Z. Invasive Water Hyacinth: Ecology, Impacts and Prospects for the Rural Economy // Plants. 2021. Vol. 10. No.1613. P. 1–23. DOI: 10.3390/plants10081613.

Holm L.G., Plucknett D.L., Pancho J.V., Herbeger J.P. World's worst weeds. Distribution and biology. Honolulu: University of Hawaii, 1977. 609 p.

Indulekha V.P., Thomas C.G., Anil K.S. Utilization of water hyacinth as livestock feed by ensiling with additives // Indian Journal of Weed Science. 2019. Vol. 51. No.1. P. 67–71.

Koncki N.G., Aronson M.F.J. Invasion Risk in a Warmer World: Modeling Range Expansion and Habitat Preferences of Three Nonnative Aquatic Invasive Plants // Invasive Plant Science and Food and Agriculture Organization of The United Nations, 2002. 28 p.

Lagutin A.A. Khanbabaeva O.E. Phytoremediation properties of water hyacinth (Eichhornia crassipes (Mart.) Solms) // *Bulletin of landscape architecture*, 2019, no. 18, pp. 52–57. (In Russian; abstract in English).

Litvinskaya S.A., Savchenko M.Yu., The question of the western caucasus invasive flora. *Botanical Bulletin of the North Caucasus*, 2016, no. 1, pp. 23–35. (In Russian; abstract in English).

Ludyansky M.L. Vyskrebets A.M. Methods for combating biological fouling in the water supply system of a metallurgical enterprise. *Industrial energy*, 1981, no. 11, pp. 34–36.

Lyubimova T.P. Parshakova Ya.N. Lepikhin A.P. Lyakhin Yu.S. Increasing the stability of cooling reservoirs' operation by using selective water intake schemes. *Water and ecology*, 2020, no. 2(82), pp. 45–58. DOI:10.23968/2305-3488.2020.25.2.45-58 (In Russian; abstract in English).

Martinez Jimenez M, Gomez Balandra M.A. Geographic distribution and the invasive scope of aquatic plants in Mexico. *BioInvasions Records*, 2022, vol. 11, no. 1, pp. 1–12. DOI:10.3391/bir.2022.11.1.01.

Mitchell D.S., Tur N.M. The Rate of Growth of Salvinia molesta (S. auriculata Auct.) in Laboratory and Natural Conditions. *Journal of Applied Ecology*, 1975, no. 12, pp. 213–225. DOI:10.2307/2401730.

Ogutu P.A. Vermicomposting water hyacinth: turning fisherman's nightmare into farmer's fortune // *International Journal of Research and Innovation in Applied Science*, 2019, vol. 4, no. 1, pp. 12–14.

Owens C.S., Madsen J.D. Low Temperature Limits of Waterhyacinth. *J. Aquat. Plant Manage*. 1995, vol. 33, pp. 63–68.

Patra S. Aquatic weed resources in India and South-East Asia // *International Journal of Current Research*., 2013, vol. 5, no. 5, pp. 1343–1345.

Process vtorichnogo zagryazneniya vodoema: osnovnye fazy i meropriyatiya po predotvrashcheniyu nezhelatel'nyh ekologicheskih posledstvij [The process of secondary pollution of a reservoir: main phases and measures to prevent undesirable environmental consequences] / Beznosov V.N., Goryunova S.V., Kuchkina M.A., Popov A.V., Suzdaleva A.A. // *Vestnik Moskovskogo*

Management. 2015. No.8. P. 1–15. DOI: 10.1614/IPSM-D-15-00020.1.

Koutika L-S., Rainey H.J. A Review of the invasive, biological and beneficial characteristics of aquatic species Eichhornia crassipes and Salvinia molesta // Applied ecology and environmental research. 2015. V. 13. No.1. P. 63–275. DOI: 10.15666/aeer/1301_263275.

Labrada R., Fornasari L. Management of problematic aquatic weeds in Africa FAO efforts and achievements during the period 1991–2001. Rome: Food and Agriculture Organization of The United Nations, 2002. 28 p.

Martinez Jimenez M., Gomez Balandra M.A. Geographic distribution and the invasive scope of aquatic plants in Mexico // BioInvasions Records. 2022. Vol. 11. No.1. P. 1–12. DOI: 10.3391/bir.2022.11.1.01.

Mitchell D.S., Tur N.M. The Rate of Growth of Salvinia molesta (S. auriculata Auct.) in Laboratory and Natural Conditions // Journal of Applied Ecology. 1975. No.12. P. 213–225. DOI: 10.2307/2401730.

Ogutu P.A. Vermicomposting water hyacinth: turning fisherman's nightmare into farmer's fortune // International Journal of Research and Innovation in Applied Science. 2019. Vol. 4. No.1. P. 12–14.

Owens C.S., Madsen J.D. Low Temperature Limits of Waterhyacinth // J. Aquat. Plant Manage. 1995. Vol.33. P.63–68.

Patra S. Aquatic weed resources in India and South-East Asia // International Journal of Current Research. 2013. Vol. 5. No.5. P. 1343–1345.

Phytoremediation of wastewater toxicity using water hyacinth (Eichhornia crassipes) and water lettuce (Pistia stratiotes) / *Victor K.K., Seka Y., Norbert K.K., Sanogo T.A., Celestin A.B.* // International Journal of Phytoremediation. 2016. Vol. 18. No.10. P. 949–955.

Saha P., Mondal A., Sarkar S. Phytoremediation of cyanide containing steel industrial wastewater by Eichhornia crassipes // International Journal of Phytoremediation. 2018. Vol. 20. No.12. P. 1205–1214.

Tellez T.R., de Rodrigo Lopez, E.M. Granado G.L., Perez E.A., Lopez R.M., Guzman J.M.S. The Water Hyacinth, Eichhornia crassipes: an invasive plant in the Guadiana River Basin (Spain) // Aquatic Invasions. 2008. Vol. 3. P. 42–53.

gosudarstvennogo oblastnogo universiteta, 2006, no. 3, pp. 84–87. (In Russian).

Saha P., Mondal A., Sarkar S. Phytoremediation of cyanide containing steel industrial wastewater by Eichhornia crassipes. *International Journal of Phytoremediation*, 2018, vol. 20, no. 12, pp. 1205–1214.

Shapovalov M.I., Saprykin M.A., Alien species Pistia stratiotes L. (Araceae) in water bodies of urbanized territories of southern Russia. *Russian Journal of Biological Invasions*, 2016, no. 1, pp. 139–146.

Shcherbakov A.V., Mayorov S.R. Alien aquatic plants in the Moscow region. *Bulletin of Udmurt University. Biology series. Geosciences*, 2013, no. 2, pp. 57–61. (In Russian).

Suzdaleva A.L. Biosocial emergencies. *Natural and technical sciences*, 2022, no. 8(171), pp. 114–115 DOI: 10.25633/ETN.2022.08.08

Suzdaleva A.L., Beznosov V.N., Goryunova S.V. Biological invasions in natural-technical systems // *Bulletin of the Russian Peoples' Friendship University. Series ecology and life safety*, 2015, no. 3, pp. 67–78.

Suzdaleva A.L., Beznosov V.N., Kuchkina M.A. Ecological mechanism of eutrophication of the cooling pond of a nuclear power plant. *Safety of energy structures*. Moscow: publ. NIIES, 2013, iss. 18, p. 158–177.

Suzdaleva A.L., Beznosov V.N., Kuchkina M.A. Environmental monitoring of water bodies and environmental audit of water users as the basis for combating biointerference in technical water supply systems. *Safety of Energy Facilities*, Moscow: publ. NIIES, 2004, iss. 14, pp. 189–206.

Taller E.B., Komandirova A.V., Ramadan R. Adventive species Pistia stratiotes L. (Araceae) in water bodies of Moscow. *Reports of the TSHA*, 2021, iss. 293(4), pp. 437–439.

Tellez T.R., de Rodrigo Lopez E.M., Granado G.L., Perez E.A., Lopez R.M., Guzman J.M.S. The Water Hyacinth, Eichhornia crassipes: an invasive plant in the Guadiana River Basin (Spain). *Aquatic Invasions*, 2008, vol. 3, pp. 42–53.

The most dangerous invasive species of Russia (TOP 100) / edited by Dgebuadze Yu.Yu., Petrosyan V.G., Khlyap L.A. Moscow: ed. KMK, 2018. 688 p.

Thomas P.A., Room P.M. Taxonomy and control of Salvinia molesta // Nature. 1986. Vol. 320. P. 581–584.

Villamagna A.M., Murphy B.R. Ecological and socio-economic impacts of invasive water hyacinth (Eichhornia crassipes): A review // Freshw. Biol. 2010. Vol. 55. No.2. P. 282–298. DOI: 10.1111/j.1365-2427.2009.02294.x.

Yan S., Guo J.Y. Water Hyacinth: Environmental Challenges, Management and Utilization. Florida: CRC Press, 2017. 345 p.

Thomas P.A., Room P.M. Taxonomy and control of Salvinia molesta. *Nature*, 1986, vol. 320, pp. 581–584.

Victor K.K., Seka Y., Norbert K.K., Sanogo T.A., Celestin A.B. Phytoremediation of wastewater toxicity using water hyacinth (Eichhornia crassipes) and water lettuce (Pistia stratiotes). *International Journal of Phytoremediation,* 2016, vol. 18, no. 10, pp. 949–955.

Villamagna A.M., Murphy B.R. Ecological and socio-economic impacts of invasive water hyacinth (Eichhornia crassipes): A review. *Freshw. Biol.,* 2010, vol. 55, no. 2, pp. 282–298. DOI:10.1111/j.1365-2427.2009.02294.x.

Yan S., Guo J.Y. *Water Hyacinth: Environmental Challenges, Management and Utilization*. Florida: CRC Press, 2017. 345 p. DOI: 10.1201/ 9781315151809.

УДК 556.5 (470.32) DOI: 10.34753/HS.2023.5.3.278

ЭКОЛОГО-ХОЗЯЙСТВЕННЫЕ РИСКИ ВОДОПОЛЬЗОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ ТРАНСФОРМАЦИИ КЛИМАТА И ВОДНОГО РЕЖИМА

В.А. Дмитриева, С. Хатунгимана

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет», г. Воронеж, Россия

verba47@list.ru

Аннотация. На примере областей Центрального Черноземья рассмотрены основные черты водного режима рек, формирующегося вследствие климатических изменений, и связанные с ними потенциальные эколого-хозяйственные риски водопользования. Для региона с выраженными аграрной и промышленной составляющими в экономике гидроэкологическое состояние рек и искусственных водоемов, как источников водоснабжения, является актуальной. Цель настоящего исследования – анализ трансформации водности речных потоков Центрального Черноземья и потенциально возможных рисков водопользования в условиях меняющихся природно-климатических условий. Исходная база данных сформирована на основе открытых и доступных источников гидрометеорологической и водохозяйственной информации. Обработка материалов производилась традиционными методами гидрометеорологической статистики, гидрологической аналогии, графической интерпретации результатов. Установлено, что в первом десятилетии текущего века в водопользовании сохранялись тенденции сокращения объемов потребления воды. В качестве примера рассмотрены объемы забора свежей воды. Во втором десятилетии количественное изъятие вод стабилизировалось. На реках наблюдается активная трансформация водности. В водном

ECOLOGICAL AND ECONOMIC RISKS OF WATER USE UNDER CONDITIONS OF CLIMATE TRANSFORMATION AND WATER REGIME

Vera A. Dmitrieva, Silas Hatungimana

Federal State Budgetary Educational Institution "Voronezh State University", Voronezh, Russia

verba47@list.ru

Abstract. Using the example of the regions of the Central Black Earth Region, the main features of the water regime of rivers formed as a result of climate change and the associated potential environmental and economic risks of water use are considered. For a region with pronounced agricultural and industrial components in the economy, the hydroecological state of rivers and artificial reservoirs as sources of water supply is relevant. The purpose of this study is to analyze the transformation of water content of river flows in the Central Black Earth Region and the potential risks of water use under changing natural and climatic conditions. The initial database was formed on the basis of open and accessible sources of hydrometeorological and water management information. The materials were processed using traditional methods of hydrometeorological statistics, hydrological analogy, and graphic interpretation of the results. It has been established that in the first decade of the current century, trends in water use continued to reduce the volume of water consumption. As an example, the volumes of fresh water intake are considered. In the second decade, the quantitative withdrawal of water stabilized. There is an active transformation of water content on the rivers. In the water regime, a decrease in runoff volumes and flood maximums, an increase in winter runoff and summer-autumn low water were noted. A special feature of the water regime is the formation of abnormally high rain floods in 2016 and 2022. The changes are associated with climate fluctuations. In the

Dmitrieva V.A., Hatungimana S. Ecological and economic risks of water use under conditions of climate transformation and water regime. *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2023, vol. 5, iss. 3, pp. 278–290. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2023.5.3.278.

режиме отмечены уменьшение объемов стока и максимумов половодья, увеличение зимнего стока и летне-осенней межени. Особая черта водного режима – образование аномально высоких дождевых паводков в 2016 и 2022 гг. Изменения связаны с климатическими флуктуациями. В исключительно маловодном 2020 г. зафиксирован максимальный расход воды половодья величиной 211 м^3/с, что в 53 раза меньше исторического максимума 1888 г., равного 11200 м^3/с. Одна из причин низких половодий – состояние почвы накануне снеготаяния, ее влагосодержание и глубина промерзания. Маловодье текущих лет чревато эколого-хозяйственными рисками, связанными как с недостатком воды в дефицитные сезоны водопотребления, например, в сельскохозяйственной отрасли летом 2020 г., так и заполнением малых искусственных водоемов, играющих важную роль в сельскохозяйственном водопользовании. При сокращении объемов стока половодья угнетается экологическая функция водного потока, его разбавляющая способность.

Ключевые слова: Центральное Черноземье; реки; водный режим; климат; водопользование; эколого-хозяйственные риски.

exceptionally low-water year 2020, the maximum flood water flow of 211 m^3/s was recorded, which is 53 times less than the historical maximum of 1888, equal to 11200 m^3/s. One of the reasons for low floods is the condition of the soil on the eve of snowmelt, its moisture content and freezing depth. The lack of water in the current years is fraught with environmental and economic risks associated both with a lack of water during scarce seasons of water consumption, for example, in the agricultural industry in the summer of 2020, and with the filling of small artificial reservoirs that play an important role in agricultural water use. When the volume of flood flow is reduced, the ecological function of the water flow and its diluting ability are inhibited.

Keywords: Central Black Earth Region; rivers; water regime; climate; water use; ecological and economic risks.

Введение

Востребованность воды в секторах экономики областей Центрального Черноземья остается достаточно высокой, несмотря на снижение объемов водопотребления в связи с кризисными явлениями в экономике перестроечных лет. Аграрная, промышленная, коммунально-бытовая отрасли экономики региона нуждаются в своевременной подаче воды в необходимом объеме и надлежащего качества. Для водоснабжения используются как поверхностные, так и подземные запасы. При этом питьевое водоснабжение осуществляется исключительно из подземной гидросферы, а промышленное и сельскохозяйственное водоснабжение комбинированно. Соотношение забора воды из поверхностных водных объектов и подземных водоносных горизонтов по годам не постоянно и зависит от объемов водопотребления отраслей экономики, территориальной природной водообеспеченности, метеорологических условий и водности конкретного года. Традиционно связанное с погодными условиями овощеводство практически полностью перешло на тепличное выращивание культур, но потребности сельского хозяйства в воде остаются высокими. Эффективность водопользования и потенциальные эколого-хозяйственные риски находятся в тесной зависимости от состояния водных объектов, прежде всего, от объемов заключенной в них воды и ее качества. Успешность и надежность функционирования отраслей экономики определяют не только общие запасы воды в руслах рек, но и равномерность или неравномерность объемов речного стока,

протекающих в главной реке и ее притоках в течение года и многолетнем периоде.

Речной сток – мера водных ресурсов – определяется комплексом факторов окружающей среды и хозяйственной деятельности в руслах рек и на водосборах, среди которых природно-климатические играют ведущую роль. В настоящее время климат планеты отличается высоким динамизмом. Его планетарные колебания вызывают реактивные изменения в северном и южном полушариях, захватывая крупные территории, в том числе в России. Масштабность современных климатических изменений и глубина ожидаемых последствий вызывают озабоченность о будущем человечества и на государственном уровне нашли отражение в ряде документов: «Климатической доктрине Российской Федерации»[1], «Стратегии экологической безопасности России до 2025 г.»[2], «Плане мероприятий по реализации Стратегии экологической безопасности России до 2025 г.»[3] и других. Они направлены на смягчение возможных отрицательных региональных проявлений климатических вызовов [Бедрицкий, и др., 2019]. Повышение температуры воздуха в Центральном Черноземье, опережающее по темпам средние показатели для европейской части России [Третий оценочный…, 2022; Дмитриева, Сушков, Закусилов, 2022; Дмитриева, Сушков, 2023], требует необходимости рассмотрения динамики водных ресурсов и возможных рисков в региональном водопользовании как ответной реакции на природно-климатические изменения.

Цель настоящего исследования – анализ трансформации водности речных потоков Центрального Черноземья и потенциально возможных рисков водопользования в условиях меняющихся природно-климатических условий.

Методы и материалы

Исходная база данных включает материалы сетевых метеорологических и гидрологических наблюдений на водных объектах и метеоплощадках областей Центрального Черноземья (метеорологичсекие станции Нижнедевицк, Воронеж, Каменная Степь, Борисоглебск, Анна, Лиски, Калач, Павловск, Богучар, Липецк, Тамбов, Курск; гидрологические посты р. Дон – г. Задонск, р. Сосна – г. Елец, р. Дон – г. Лиски, р. Воронеж – г. Липецк-2, р. Хопер – г. Поворино, р. Савала – г . Жердевка и другие). Период наблюдений для большинства стационарных пунктов исчисляется с 1920-х гг. по 2022 г. включительно. Ряды наблюдений проверены на однородность, для чего использованы суммарные интегральные кривые. Пропуски в наблюдениях, приходящиеся исключительно на годы Великой Отечественной войны, восстановлены методом гидрологической аналогии. Объемы годового и сезонного стока (весны, лета и осени) рассчитаны за календарные сроки, а зимнего – за декабрь предыдущего – февраль последующего года без временного разрыва. Обработка материалов и графические построения выполнены с использованием программ MS Excel, Statistica, Hydrostatcalc. Полученные результаты представлены в графической интерпретации.

[1] Климатическая доктрина Российской Федерации (утв. распоряжением Президента РФ от 17 декабря 2009 г. N 861-рп). – URL: http://www.kremlin.ru/acts/news/6365 (дата обращения: 09.04.2021) Klimaticheskaya doktrina Rossiyskoy Federacii (utv. rasporyazheniem Prezidenta RF ot 17 dekabrya 2009 g. N 861-rp). – URL: http:www.kremlin.ru.acts.ews.6365 (data obrashcheniya: 09.04.2021)

[2] Стратегия экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года (утв. указом Президента РФ от 19.04.2017 N 176). – URL: https://docs.cntd.ru/document/420396664 (дата обращения: 09.04.2023) Strategiya ekologicheskoy bezopasnosti Rossiyskoy Federacii na period do 2025 goda (utv. ukazom Prezidenta RF ot 19.04.2017 N 176). – URL: https: docs.cntd.ru.document.420396664 (data obrashcheniya: 09.04.2023)

[3] План мероприятий по реализации Стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 г. (утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 29 мая 2019 г. N 1124-р). – URL: http://government.ru/docs/36912/ (дата обращения: 09.04.2023) Plan meropriyatiy po realizacii Strategii ekologicheskoy bezopasnosti Rossiyskoy Federacii na period do 2025 goda (utv. rasporyazheniem Pravitel'stva Rossiyskoy Federacii ot 29 maya 2019 g. N 1124-r). URL: http: government.ru.docs.36912. (data obrashcheniya: 09.04.2023)

Результаты и обсуждение

Водопользование, согласно Водному кодексу Российской Федерации[1], определяется как процесс использования водных ресурсов с целью удовлетворения потребностей населения и общественного хозяйства. Оно может осуществляться с изъятием воды из водного объекта (для нужд промышленности, сельского хозяйства, хозяйственно-питьевого водоснабжения) либо без изъятия (деятельность водного транспорта, рыбоводства, гидроэнергетики и других отраслей). В Центральном Черноземье ресурсы рек и искусственных водоемов используются в качестве источников водоснабжения и одновременно приемников сточных вод.

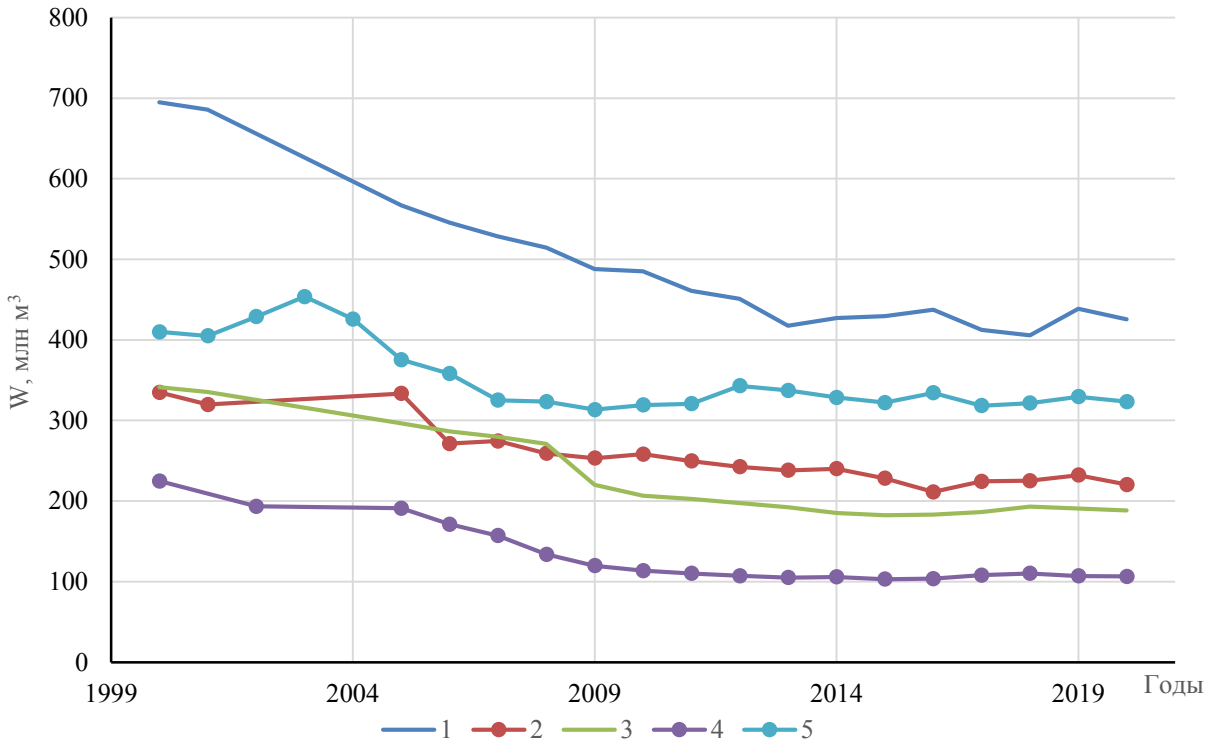


Рисунок 1. Объемы забора свежей воды W из водных объектов по областям Центрального Черноземья (1 – Воронежская область, 2 – Курская область, 3 – Липецкая область, 4 – Тамбовская область, 5 – Белгородская область) за период 2000–2020 гг. [Водный кадастр…, 2020], ЕМИСС[2]

Figure 1. Volumes of fresh water withdrawal W from water sources in the regions of the CDR (1 – Voronezh region, 2 – Kursk region, 3 – Lipetsk region, 4 – Tambov Region, 5 – Belgorod region) for the period 2000–2020. [Water Cadastre. Water Resources...., 2020]; EMISS[2]

Объемы забора воды из поверхностных водных объектов, преимущественно речных потоков, и подземных водозаборов определяются водностью года и маловодного периода, распределением речного стока по сезонам, объемами стока половодья и межени, фактическими потребностями в воде и необходимостью сохранения экологической безопасности забора воды без нанесения ущерба гидроэкосистеме водного объекта. Заборы свежей воды из водных объектов не нарушают природное равновесие и баланс веществ до тех пор, пока в водных объектах остается гарантированный для их нормального функционирования объем воды.

[1] Водный кодекс Российской Федерации с изменениями и дополнениями на 2023 г. Изд-во «ЭКСМО», 2023. 64 с. Vodnyy kodeks Rossiyskoy Federatsii s izmeneniyami i dopolneniyami na 2023 g. [The Water Code of the Russian Federation with amendments and additions as of 2023]. EKSMO, 2023. 64 p.

[2] Государственная статистика. ЕМИСС Государственная статистика. *ЕМИСС*. – URL: https:www.fedstat.ru/indicator/38136/ (дата обращения: 25.10.2023)
Gosudarstvennaya statistika. EMISS [State statistics.EMISS]. – URL: https:www.fedstat.ru/indicator.38136 (25.10.2023 (In Russian)

Изъятие воды для использования на рубеже веков продолжало сокращаться, что было связано с кризисными явлениями в экономике России в целом, и в бассейне Дона в частности [Демин, 2020]. Впоследствии (в 2014–2020 гг.) в регионе изъятие воды стабилизировалось (рисунок 1).

Из областей Центрального Черноземья наиболее значительные объемы забора свежей воды на протяжении всех рассматриваемых лет осуществляются в Воронежской области. В 2000 г. они составляли 709,4 млн м^3, а в 2021 г. – 425 млн м^3. Минимальный объем водозабора был в 2018 г. – 405,5 млн м^3, но в 2013–2020 гг. объемы отбора воды стабилизировались на минимальных значениях. Наименьшие по объему изъятия вод имеют место в Тамбовской области, а стабилизация водозаборов на минимальных объемах сложилась в 2010–2020 гг. Водопользование и, в частности, заборы воды как важная часть водохозяйственных отношений, отражает специфику функционирования отраслевых водопотребителей в регионах с одной стороны, а с другой – координируется ресурсными возможностями водных объектов, которые формируются в условиях высокого динамизма климата текущего столетия и маловодья, охватившего реки региона (например, р. Дон и ее притоки начиная с 2007 г.[Дмитриева, 2015; Джамалов и др., 2017]).

Годовые и сезонные температуры воздуха растут стремительно, особенно в первом десятилетии текущего века [Дмитриева, Сушков, 2023], согласуясь с ходом на европейской части России [Третий оценочный…, 2022]. Рост температуры воздуха на региональном уровне составляет 0,05 °С/год и сопоставим со средним значением по европейской части России, равным 0,51 °С за каждое десятилетие 1976–2020 гг.

На территории Центрального Черноземного региона (ЦЧР) температурный скачок образовался в первом десятилетии текущего века, которое стало самым теплым, что хорошо иллюстрируется графиком средних за десятилетия температур воздуха по метеостанции Павловск Воронежской области (рисунок 2).

В последующие годы температура продолжала расти, но скачкообразно. Подобная динамика температуры воздуха характерна для всех областей региона, а ее повышение наиболее выраженно проявляется в Белгородской области. Температурные изменения вызывают количественный и качественный отклик в состоянии водной среды. С позиции водопользования прежде всего важны объемы воды, возможные для перспективного изъятия, особенно в маловодные годы и дефицитные по водности сезоны года, с одной стороны, а с другой – достаточные для разбавления сточных вод. Трансформация речных водных ресурсов в ответ на климатические вызовы проявляется в уменьшении объемов весеннего снегового половодья, увеличении зимнего стока и незначительном росте летне-осеннего стока. Наибольший расход воды весеннего половодья по данным реперного гидропоста р. Дон – г. Лиски в текущем столетии зафиксирован в 2003 г. и равен 2380 м^3/с. В сравнении с историческим максимумом, измеренным в 1888 г. со значением 11200 м^3/с, он оказался меньше в 4,7 раза. В последующие после 2003 годы максимальные расходы приближались к этой величине лишь в 2010 (1800 м^3/с) и 2013 (1950 м^3/с) гг. Второе десятилетие завершилось исторически низким половодьем 2020 года с катастрофически малым максимальным расходом – 211 м^3/с. Сформировалась историческая гидрологическая аномалия исключительно низкого половодья, которая обусловлена изменившимся генезисом вследствие климатических вариаций. Так, в зиму 2019–2020 гг. на метеостанции Лиски высота снежного покрова к началу февраля составляла 49 см, что выше нормы, а запас воды в снеге 113 мм, что почти в 4 раза выше нормы. Но глубина промерзания почвы составила 27 см, что ниже нормы в 3,5 раза. Низкое промерзание почвы стало первопричиной формирования нетипичного снегового половодья.

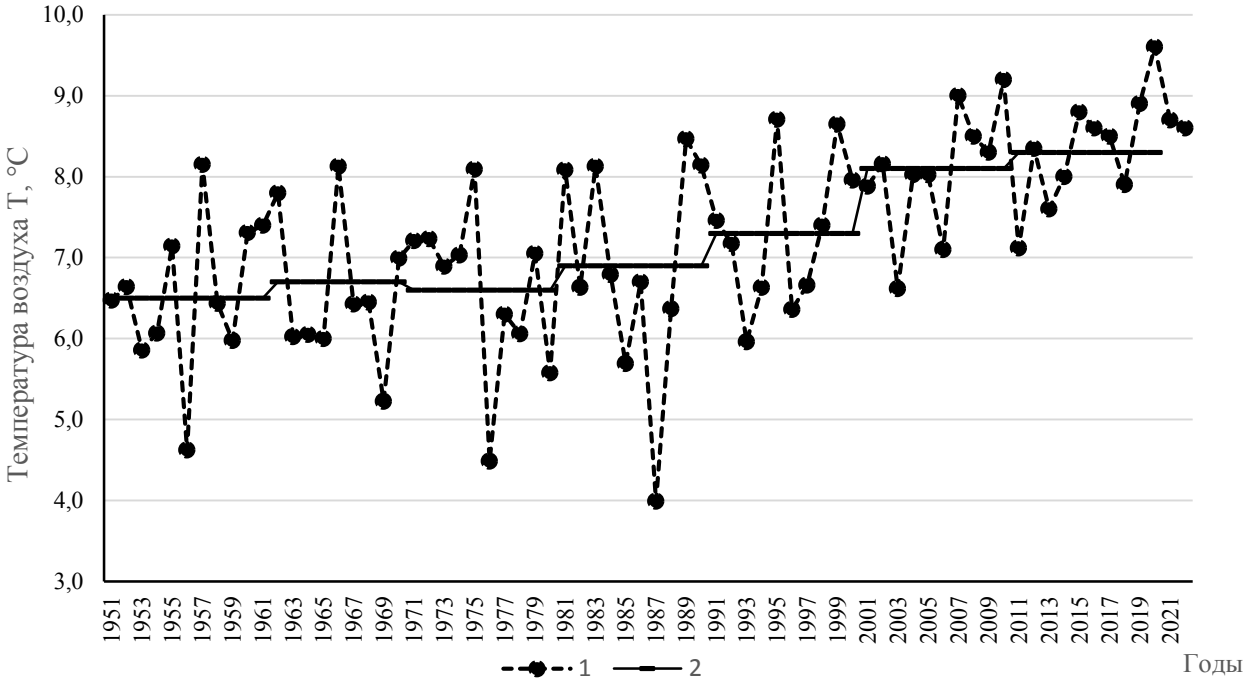


Рисунок 2. Динамика среднегодовой (1) и средней по десятилетиям (2) температуры воздуха по метеостанции Павловск Воронежской области за 1949–2022 гг.

Figure 2. Dynamics of annual (1) and decadal average (2) air temperature at Pavlovsk meteorological station in Voronezh region for years 1949–2022

В связи с этим в многолетней динамике водных ресурсов отмечаются как периоды повышенной, так и периоды пониженной водности. В исследованиях водного режима рек Донского, Днепровского и Волжского бассейнов в пределах Центрального Черноземья указывается на глубокие и разнонаправленные тенденции в фазах водного режима [Дмитриева, 2020; Кумани, Шульгина, Киселев, 2021; Буковский, Чернова, 2018; Джамалов и др., 2017]. Они подтверждают изменения, характерные для европейской части России [Магрицкий, Евстигнеев, Юмина, 2018; Юмина, Магрицкий, 2023; Сивохип, Павлейчик, Чибилев, 2019; Коронкевич, Георгиади, Ясинский, 2018]. При этом годовые водные ресурсы либо меняются незначительно (Верхний Дон), либо уменьшаются (Нижний Дон), но в целом речной сток российских рек увеличивается [Водные ресурсы…, 2008; Дмитриева, 2020; Дмитриева, Бучик, 2023; Научно-прикладной справочник…, 2021].

Однако внутри года, по сезонам и периодам, объемы стока изменяются весьма существенно. Во внутригодовом распределении речного стока, а, следовательно, и водных ресурсов происходит выравнивание внутрисезонных различий, что имеет свои позитивные и негативные стороны для водопользования и возникновения эколого-водохозяйственных рисков [Дмитриева, 2015; 2020]. При сокращении объемов стока половодья, пока еще составляющего основную часть годового стока для большинства рек региона, снижается экологическая функция водного потока, прежде всего разбавляющая.

Сезонный сток в средний по водности год в бассейнах рек Центрального Черноземья в конце 1980-х гг. характеризовался следующими долями в процентах от годового стока: весна – 69 %, лето – 10 %, осень – 10 %, зима – 11 % [Дмитриева, 2015]. Распределение объемов стока по сезонам маловодного периода было примерно одинаковым. Но в верховье Дона, до впадения р. Сосны, соотношение сезонного стока было иным, чем в среднем по бассейнам Днепра, Волги, Дона в пределах Центрального Черноземья. Верховье Дона с впадающими притоками Красивая Меча, Тим, Олым, Труды, характеризуется обильным грунтовым питанием

за счет многочисленных выходов подземных источников на их водосборах. Доля подземного питания доходит до 40 %. Для среднего по водности года на весну, лето, осень и зиму приходилось соответственно 60, 15, 13, 12 % от годового стока.

Современные объемы сезонного стока перераспределились и увеличились в пользу зимнего стока на 1,6–10,2 %, летнего – 2,4–20,9 % и осеннего – 3,4–16,0 % по данным наблюдений до 2012 г. включительно [Дмитриева, 2015]. Как следует из сказанного, строгой закономерности в приращении сезонного и меженного стока не наблюдается.

Устойчивая межень с низкими расходами и уровнями воды устанавливается к началу июня. Минимальные расходы воды летне-осенней межени на большинстве рек в 20–30 раз меньше максимальных расходов весеннего половодья вследствие малой аккумуляции грунтовой воды в почво-грунтах водосборов. Сравнительно низкая летне-осенняя межень изредка нарушается дождевыми паводками, чаще приуроченным к осенним и зимним месяцам.

Ранее осенние дождевые паводки были не ежегодными, непродолжительными, и сток от них составлял в объеме питания рек не более 5 %. В 2016 и 2022 гг. образовались такие мощные дождевые паводки, по времени приуроченные к весне-лету (2016 г., рисунок 3а) и осени-зиме (2022 г. рисунок 3б), что они поменяли классическое представление о восточно-европейском типе водного режима рек.

Зимние паводки и подъемы уровней вызываются оттепелями, чаще наблюдающимися во второй половине зимы, в феврале. В современный климатический период зимние паводки вследствие февральских оттепелей стали характерным явлением. В Белгородской области на реках Тихая Сосна, Черная Калитва, Везелка и других сплошной ледяной покров почти не образуется. Ледовый режим характеризуется временными ледовыми явлениями, в частности, заберегами, ледоходом. Увеличивается продолжительность безморозного и безледного периода. Возрастает доля жидких осадков в годовом количестве. Соответственно возрастает и вероятность формирования продолжительных дождевых паводков. Главным источником образования дождевых паводков являются интенсивные, ливневого или длительные обложного характера жидкие атмосферные осадки. Последние и стали фактором аномальных дождевых паводков на реках Битюг и Дон, гидрографы по которым приводятся нами в качестве иллюстрации к сказанному (рисунки 3а и 3б).

Как следует из совмещенного анализа среднесуточных расходов воды и месячных сумм осадков, в 2016 г. (рисунки 3а и 3в) сформировался дождевой паводок, который по максимальному значению в 1,5 раза превысил наибольший расход воды снегового половодья. Формирование аномального паводка обязано обильным осадкам, в 4,5 раза превысившим месячную норму. Продолжительность их выпадения была также рекордно большой – почти 4 месяца непрерывных дождей. Поскольку дожди начались на спаде половодья и приняли затяжной характер, то в результате паводок наложился на основную волну спада половодья, и процесс принял сложный, атипичный снего-дождевой характер, длившийся 183 суток. С позиции водопользования увеличение водности в весенний и летний сезон благоприятно для отраслей, ориентированных на забор и сброс воды в водные источники.

Осенью 2022 г. на реках Донского бассейна (рисунки 3б и 3г) сложилась неординарная гидрологическая ситуация. В осенне-зимний период сформировался дождевой паводок в результате мощных осенних осадков. Максимум количества осадков пришелся на сентябрь, но и в последующие месяцы до конца года их величина превышала многолетнюю норму. В результате 19 декабря сформировался пик дождевого паводка, в 1,6 раза превысивший снеговой максимум. Большие осадки переувлажнили почву, создали угрозу выполнению сельскохозяйственных работ по уборке сахарной свеклы, кукурузы, подсолнечника. В почве было так много влаги, что ее перенасыщение благоприятно сказалось на ходе весеннего половодья 2023 г., которое при средних снегозапасах и запасах воды в снеге оказалось выше среднего уровня последних лет.

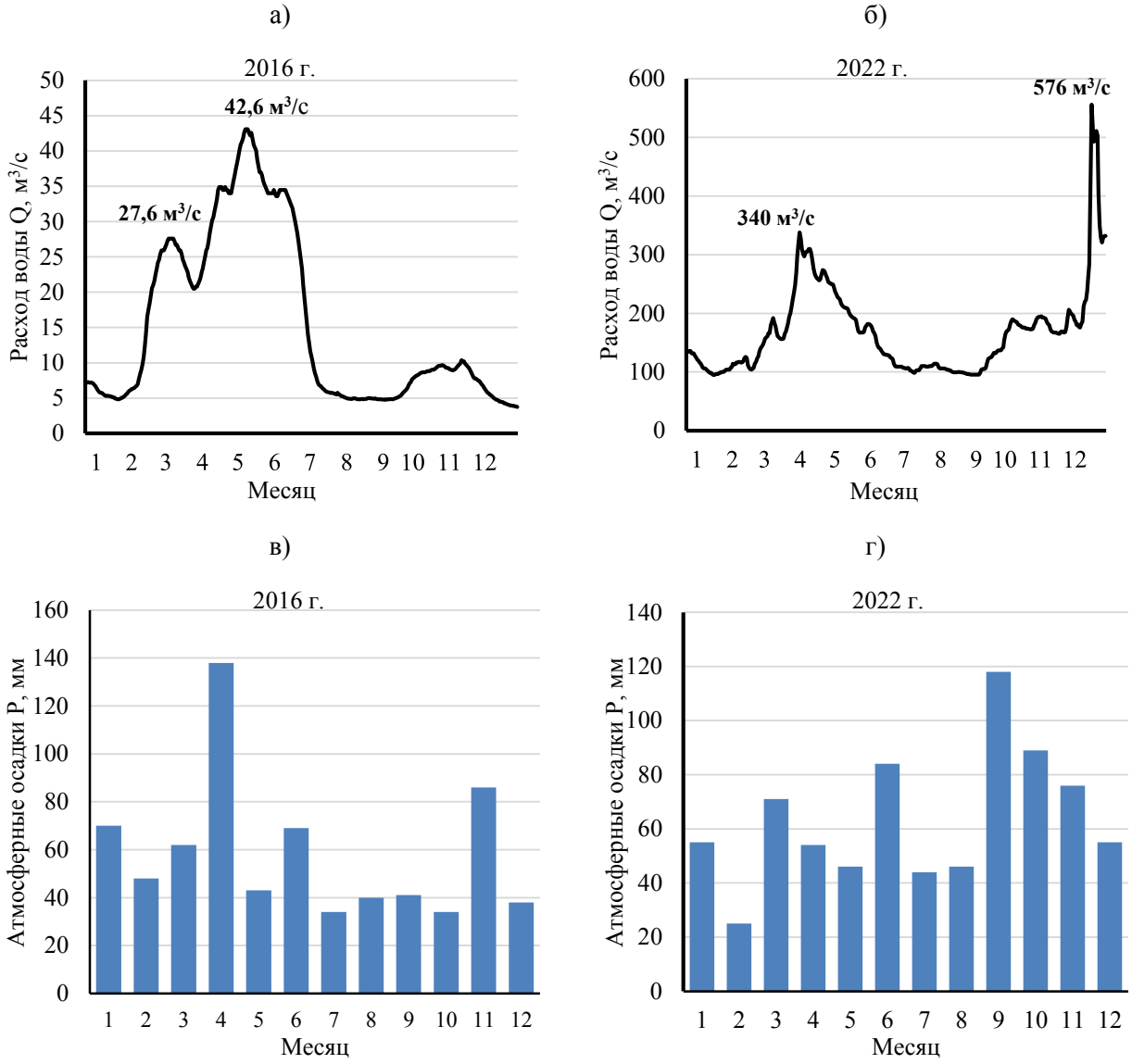


Рисунок 3. Совмещенные графики ежедневных расходов воды по гидропостам р. Битюг – г. Бобров (а) и р. Дон – г. Лиски (б) и среднемесячных сумм осадков по метеостанциям Анна (в) и Лиски (г)
Figure 3: Combined graphs of daily water discharge by gauging stations the Bityug river – Bobrov city (a), the Don river– Liski city (b) and average monthly precipitation at meteorological stations Anna (c) and Liski (d)

Рассмотренные гидрологические аномалии паводков стали возможны благодаря современным климатическим процессам. Очевидно, что при дальнейшем потеплении климата подобные аномалии могут стать вполне обычными.

Приведенные нетипичные гидрологические ситуации происходят на фоне маловодья в бассейне Дона, отмечаемого исследователями гидрологического режима донских рек [Джамалов и др., 2017; Дмитриева, 2020; Дмитриева, Бучик, 2019; 2023]. Данный факт настораживает водопользователей, поскольку нехватка воды чревата отрицательными последствиями для экономики. В бассейне Верхнего Дона 2020 г. отмечен историческим минимумом водности. Максимальный расход половодья р. Дон – г. Лиски (реперный гидропост) едва достиг значения 211 м^3/с, что в 53 раза меньше исторически самого высокого, равного 11200 м^3/с, измеренного в 1888 г. Водные ресурсы в областях Центрального Черноземья оказались исключительно низкими, что создало напряженную водохозяйственную обстановку и

стало причиной увеличения гидроэкологических рисков водопользования. Из-за очень низкой водности в Курской области в 2020 г. создалась тяжелая ситуация с водообеспечением из поверхностных водных объектов. Доля объема водозабора по областям варьировала в диапазоне 1,6–7,2 % от объема водных ресурсов данного года (таблица).

Таблица. Соотношение объема водозабора и водных ресурсов в 2020 г. [составлено и рассчитано по материалам Водный кадастр. Ресурсы поверхностных…, 2021]
Table. Ratio of water withdrawal volume and water resources in year 2020 [compiled and calculated from Water Cadastre. Surface resources..., 2021]

Область	Водные ресурсы, км^3/год		Объем забора в 2020 г.	
	средние многолетние	2020 г.	км^3	% от объема водных ресурсов
Белгородская	2,7	1,6	0,039	2,4
Воронежская	13,6	7,0	0,230	3,2
Курская	3,9	1,6	0,116	7,2
Липецкая	6,3	3,7	0,058	1,6
Тамбовская	4,1	2,8	0,115	4,1

Маловодье 2020 г. глубоко не сказалось на работе отраслевых водопотребителей. Недостающие объемы скомпенсированы за счет водоотбора из подземной гидросферы. Вместе с этим многочисленные пруды сельскохозяйственного, рыбоводного, рекреационного и комплексного назначения остались без заполнения их талой снеговой водой и стали сухими даже в районах, в которых они никогда не пересыхали за весь период их существования (например, в Нижнедевицком Воронежской области). Подобные сложности с заполнением прудов отмечались и в 2002, 2011, 2014 гг. с низкой водностью. При этом сельскохозяйственная отрасль в 2020 г. испытывала острый недостаток водных ресурсов в вегетационный период.

Заключение

По результатам настоящего исследования сделаем следующие выводы. Региональное повышение температуры воздуха способствует трансформации генезиса половодья и межени, водного режима рек. В связи с уменьшением объемов речного стока половодья и продолжающейся фазы маловодья, длящейся с 2007 г., создаются предпосылки, а в отдельные годы (например, 2020 г.), фактическая угроза гарантированному водообеспечению поверхностными водами. В исключительно маловодный 2020 г. объем забора воды за год по административным областям варьировал в диапазоне 1,6 (Липецкая область) – 4,1 % (Тамбовская область) от годовых водных ресурсов. В сельскохозяйственной отрасли создалась напряженность с водообеспечением.

Снижение водности половодья ведет к ослаблению разбавляющей функции водного потока и ухудшению качества воды вследствие поступления загрязненных сточных вод. Уменьшение ассимилирующей способности потока создает эколого-хозяйственные риски водопользования отраслевым экономикам региона. Предотвращение негативных последствий трансформации водных ресурсов видится в принятии превентивных мер, направленных на дальнейшую разработку и внедрение водосберегающих технологий и увеличение вариантов перехода на замкнутые циклы водоснабжения в промышленном производстве, снижении объемов сточных вод с загрязнением выше разбавляющей способности потока, сокращении потерь при транспортировке воды к потребителю.

Литература

Бедрицкий А.И., Куролап С.А., Вильфанд Р.М., Дмитриева В.А. Стратегические направления обеспечения экологической и гидрометеорологической безопасности России в условиях современных климатических изменений // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. 2019. №4. С. 5–14. DOI: 10.17308/geo.2019.4/2706.

Буковский М.Е., Чернова М.А. Оценка изменения летнего стока рек Донского бассейна на территории Тамбовской области за последние полвека // Экология речных бассейнов: труды IX Международной научно-практической конференции. 2018. С. 33–39.

Водные ресурсы России и их использование: монография / Ред. И.А. Шикломанов. СПб.: Гос. гидрол. ин-т.. 2008. 600 с.

Водный кадастр Российской Федерации. Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество. Ежегодное издание. 2020 год. 153 с. URL: ttp://www.hydrology.ru/sites/default/files/Books/vodnye_resursy_2020.pdf (дата обращения: 25.10.2023).

Демин А.П. Водообеспечение населения и объектов экономики в бассейне реки Дон: современное состояние и проблемы // Водные ресурсы. 2020. Т.47 (6). С. 767–778. DOI: 10.31857/S0321059620060048.

Джамалов Р.Г., Киреева М.Б., Косолапов А.Е., Фролова Н.Л. Водные ресурсы бассейна Дона и их экологические состояние: монография. М.: ГЕОС, 2017. 204 с.

Дмитриева В.А. Водные ресурсы Воронежской области в условиях меняющихся климата и хозяйственной деятельности. Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2015. 192 с.

Дмитриева В. А. Современные изменения водного режима и морфометрии рек Верхнедонского бассейна // Известия Российской академии наук, Сер. географическая. 2020. №1. С. 103–113. DOI: 10.31857/S2587556620010070

References

Bedrickiy A.I., Kurolap S.A., Vil'fand R.M., Dmitrieva V.A. Strategicheskie napravleniya obespecheniya ekologicheskoy i gidrometeorologicheskoy bezopasnosti Rossii v usloviyah sovremennyh klimaticheskih izmeneniy [Strategic Directions for Ensuring Environmental and Hydrometeorological Safety in Russia amid Modern Climate Change]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiya. Geoekologiya [Bulletin of Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology]*, 2019, no. 4, pp. 5–14. DOI: 10.17308/geo.2019.4/2706 (In Russian).

Bukovskiy M.E., Chernova M.A. Ocenka izmeneniya letnego stoka rek Donskogo basseyna na territorii Tambovskoy oblasti za poslednie polveka [Assessment of the Summer Runoff Changes of the Don River Basin Rivers in the Tambov Region over the Last Half a Century]. *Ekologiya rechnyh basseynov: trudy IX Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii [Ecology of River Basins: Proceedings of the 9th International Scientific and Practical Conference]*, 2018, pp. 33–39. (In Russian).

Vodnye resursy Rossii i ih ispol'zovanie: monografiya [Water resources of Russia and their utilization: monograph]. 2008. Red. I.A. SHiklomanov, SPb.: Gos. gidrol. in-t. 600 p. (In Russian).

Vodnyy kadastr Rossiyskoy Federacii. Resursy poverhnostnyh i podzemnyh vod, ih ispol'zovanie i kachestvo. Ezhegodnoe izdanie. 2020 god. [Water Cadastre of the Russian Federation. Surface and groundwater resources, their utilization, and quality. Yearly publication. 2020]. 153 p. URL: http:www.hydrology.ru.sites.default.files. Books.vodnye_resursy_2020.pdf (data obrashcheniya: 25.10.2023). (In Russian).

Demin A.P. Vodoobespechenie naseleniya i ob"ektov ekonomiki v basseyne reki Don: sovremennoe sostoyanie i problem [Water supply for the population and economic facilities in the Don River basin: current status and issues]. *Vodnye resursy [Water resources]*, 2020, vol.47 (6),

Дмитриева В.А., Бучик С.В. Природные аномалии водности рек Верхнедонского бассейна и их гидроэкологические последствия // Естественные и технические науки. Москва, 2019. №2 (128). С. 153–156.

Дмитриева В.А., Бучик С.В. Гидроэкологические трансформации и экологический сток в бассейне Верхнего Дона: монография. Воронеж: «Цифровая полиграфия», 2023. 150 с.

Дмитриева В.А., Сушков А.И. Температурный режим Воронежской области в условиях меняющегося климата // Вестник Воронежского университета. Серия: География. Геоэкология. 2023. №2. С. 56–63. DOI: 10.17308/geo/1609-0683/2023/2/56-63.

Дмитриева В.А., Сушков А.И., Закусилов В.П. Климатическая обусловленность современных гидроэкологических процессов в речных потоках бассейна Верхнего Дона // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. 2022. № 2. С. 118–127. DOI: 10.17308/ geo.2022.2/9318.

Кумани М.В., Шульгина Д.В., Киселев В.В. Многолетняя динамика основных элементов стока рек в пределах Центрального Черноземья // Региональные геосистемы. 2021. 45 (4). С. 617–631. DOI: 10.52575/2712-7443-2021-45-4-617-631.

Коронкевич Н.И., Георгиади А.Г., Ясинский С.В. О гидрологических изменениях // Вопросы географии. Сб. 145: Гидрологические изменения / Ред. Котляков, Н.И. Коронкевич. М.: Кодекс. 2018. С. 15–34.

Магрицкий Д.В., Евстигнеев В.М., Юмина Н.М. и др. Изменения стока в бассейне р. Урал // Вестн. Моск. ун-та. Сер.5. География. 2018. №1. С. 90–101.

Научно-прикладной справочник: Многолетние колебания и изменчивость водных ресурсов и основных характеристик стока рек Российской Федерации / Ред. В.Ю. Георгиевский. СПб.: ООО "РИАЛ", 2021. 190 с.

Сивохип Ж.Т., Павлейчик В.М., Чибилёв А.А. Изменение водного режима рек бассейна реки Урал // Доклады РАН. Науки о Земле. 2019. pp. 767–778. DOI: 10.31857/S0321059620060048. (In Russian).

Dzhamalov R.G., Kireeva M.B., Kosolapov A.E., Frolova N.L. *Vodnye resursy basseyna Dona i ih ekologicheskie sostoyanie : monografiya [Water resources of the Don River basin and their ecological condition: a monograph]*. M.: GEOS, 2017. 204 p. (In Russian).

Dmitrieva V.A. *Vodnye resursy Voronezhskoy oblasti v usloviyah menyayushchihsya klimata i hozyaystvennoy deyatel'nosti [Water resources of the Voronezh region in the conditions of changing climate and economic activities]*. Voronezh: Izdatel'skiy dom VGU, 2015. 192 p. (In Russian).

Dmitrieva V. A. Sovremennye izmeneniya vodnogo rezhima i morfometrii rek Verhnedonskogo basseyna [Modern changes in the water regime and morphometry of the Upper Don River basin rivers] *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk, Ser. Geograficheskaya [Bulletin of the Russian Academy of Sciences, Geography Series],* 2020, no.1, pp. 103–113. DOI: 10.31857/S2587556620010070 (In Russian).

Dmitrieva V.A., Buchik S.V. Prirodnye anomalii vodnosti rek Verhnedonskogo basseyna i ih gidroekologicheskie posledstviya [Natural anomalies of water content in the rivers of the Upper Don basin and their hydroecological consequences] *Estestvennye i tehnicheskie nauki [Natural and Technical Sciences]*. Moskva, 2019, no. 2 (128), pp. 153–156. (In Russian).

Dmitrieva V.A., Buchik S.V. *Gidroekologicheskie transformacii i ekologicheskiy stok v basseyne Verhnego Dona: monografiya [Hydroecological transformations and ecological flow in the Upper Don basin: a monograph]*. Voronezh: «Cifrovaya poligrafiya» 2023. 150 p. (In Russian).

Dmitrieva V.A., Sushkov A.I. Temperaturnyy rezhim Voronezhskoy oblasti v usloviyah menyayushchegosya klimata [Temperature Regime of the Voronezh Region in the Conditions of Changing Climate]. *Vestnik Voronezhskogo universiteta. Seriya: Geografiya. Geoekologiya [Bulletin of Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology],* 2023, no.2, pp. 56–63.

Том 488. №5. С.103–107. DOI: 10.31857/S0869-56524885.

Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. СПб.: Наукоемкие технологии, 2022. 124 с.

Юмина Н.М., Магрицкий Д.В. Обоснование и анализ статистических зависимостей годового стока рек бассейна Урала от метеорологических показателей // Вопросы степеведения. 2023. №2. С. 13–25. DOI: 10.24412/2712-8628-2023-3-13-25.

DOI: 10.17308.geo.1609-0683.2023.2.56-63. (In Russian).

Dmitrieva V.A., Sushkov A.I., Zakusilov V.P. Klimaticheskaya obuslovlennost' sovremennyh gidroekologicheskih processov v rechnyh potokah basseyna Verhnego Dona [Climate-Related Nature of Contemporary Hydroecological Processes in River Streams of the Upper Don Basin]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiya. Geoekologiya [Bulletin of Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology],* 2022, no. 2, pp. 118–127. DOI: 10.17308.geo.2022.2.9318. (In Russian).

Kumani M.V., SHul'gina D.V., Kiselev V.V. Mnogoletnyaya dinamika osnovnyh elementov stoka rek v predelah Central'nogo CHernozem'ya [Long-term dynamics of the main elements of river runoff within the Central Chernozem region] *Regional'nye geosistemy [Regional Geosystems],* 2021, vol. 45 (4), pp. 617–631. DOI: 10.52575.2712-7443-2021-45-4-617-631. (In Russian).

Koronkevich N.I., Georgiadi A.G., YAsinskiy S.V. O gidrologicheskih izmeneniyah [On Hydrological Changes]. *Voprosy geografii [Questions of Geography]. Sb. 145: Gidrologicheskie izmeneniya. Red. Kotlyakov, N.I. Koronkevich*. M.: Kodeks, 2018, pp. 15–34. (In Russian).

Magrickiy D.V., Evstigneev V.M., YUmina N.M. Izmeneniya stoka v basseyne r. Ural [Runoff changes in the Ural River basin]. *Vestn. Mosk. un-ta. Ser.5. Geografiya [Bull. Moscow Univ. Ser. 5. Geography],* 2018, no.1, pp. 90–101. (In Russian).

Nauchno-prikladnoy spravochnik: Mnogoletnie kolebaniya i izmenchivost' vodnyh resursov i osnovnyh harakteristik stoka rek Rossiyskoy Federacii [Scientific and Applied Handbook: Long-term fluctuations and variability of water resources and key streamflow characteristics of the rivers of the Russian Federation]. Red. V.YU. Georgievskiy. SPb.: OOO "RIAL", 2021. 190 p. (In Russian).

Sivohip ZH.T., Pavleychik V.M., Chibilyov A.A. Izmenenie vodnogo rezhima rek basseyna reki Ural [Changes in the water regime of the rivers in the Ural River basin]. *Doklady RAN. Nauki o Zemle [Reports of the Russian Academy of Sciences. Earth*

Sciences], 2019, vol 488, no. 5., pp.103-107. DOI: 10.31857.S0869-56524885. (In Russian).

Tretiy ocenochnyy doklad ob izmeneniyah klimata i ih posledstviyah na territorii Rossiyskoy Federacii [Third Assessment Report on Climate Change and its Impacts in the Russian Federation]. Obshchee rezyume. SPb.: Naukoemkie tehnologii, 2022. 124 p. (In Russian).

Yumina N.M., Magrickiy D.V. Obosnovanie i analiz statisticheskih zavisimostey godovogo stoka rek basseyna Urala ot meteorologicheskih pokazateley [Substantiation and analysis of statistical relationships of annual runoff of the rivers in the Ural River basin with meteorological indicators]. *Voprosy stepevedeniya [Issues of Steppes Studies],* 2023, no.2, pp. 13–25. DOI: 10.24412.2712-8628-2023-3-13-25. (In Russian).

УДК 519.876.5 DOI: 10.34753/HS.2023.5.3.291

ОБЕСПЕЧЕНИЕ МОНИТОРИНГА ПОДЗЕМНЫХ И ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД В РАЙОНЕ РАЗМЕЩЕНИЯ НОВОВОРОНЕЖСКОЙ АЭС С ЦЕЛЬЮ ОЦЕНКИ ПОСЛЕДСТВИЙ МИГРАЦИИ РАДИОНУКЛИДОВ ИЗ ХРАНИЛИЩА РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ (1985 г.)

Д. А. Шаров[1], А. С. Коротков[1], И. В. Пырков[1], В. П. Поваров[2], А. П. Щукин[2], С. В. Росновский[2], В. Н. Карасев[2], В. С. Росновский[2]

[1]АО «ВНИИАЭС», г. Москва, Россия;
[2]Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская АЭС», г. Нововоронеж, Россия

RosnovskySV@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Аннотация. Данная статья посвящена радиационному мониторингу зоны влияния утечки жидких радиоактивных отходов (ЖРО) из хранилища жидких отходов № 2 (ХЖО-2) Нововоронежской АЭС (НВАЭС) 1985 г. Инцидент привел к радиоактивному загрязнению грунта и грунтовых вод, при этом перенос радионуклидов с грунтовыми водами из места утечки способствовал радиоактивному загрязнению водных объектов, находящихся в зоне влияния утечки.

Все эти годы проводились исследования, в ходе выполнения расчетных и полевых экспериментальных работ по радиационному мониторингу зоны влияния утечки из хранилища жидких отходов были получены основные результаты по выявлению причин и оценен масштаб инцидента на Нововоронежской АЭС. Результаты исследований использованы для обоснования безопасности при эксплуатации объектов Нововоронежской и других АЭС, но несмотря на большой объем проведенных исследований, остается нерешенными ряд задач по оценке отдаленных последствий утечки жидких

HYDROSPHERE MONITORING IN THE AREA OF NOVOVORONEZH NPP LOCATION IN ORDER TO ASSESS CONSEQUENCES OF RADIONUCLIDE MIGRATION FROM THE LRWS-2 (in 1985)

Dmitry A. Sharov[1], Alexey S. Korotkov[1], Igor V. Pyrkov[1], Vladimir P. Povarov[2], Alexey P. Shchukin[2], Sergey V. Rosnovsky[2], Viacheslav N. Karasev[2], Viktor S. Rosnovsky[2]

[1]JSC «VNIIAES», Moscow, Russia;
[2]Novovoronezh NPP Branch of JSC Rosenergoatom

RosnovskySV@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Abstract. The article is dedicated to radiation monitoring of liquid radioactive waste leakage from Novovoronezh NPP liquid radwaste storage No. 2 (LRWS-2) in 1985. The incident resulted in radioactive contamination of soil and groundwater. Moreover, radionuclides transfer with groundwater from the leakage site contributed to radioactive contamination of water reservoirs located in the affected area.

During these years studies have been carried out and in the course of calculations and field experimental work on radiation monitoring of the area effected by the leakage from the liquid waste storage facility, the main results were obtained to identify causes and assess the scale of Novovoronezh NPP incident. The research results were used for justification of Novovoronezh NPP and other nuclear power plants facilities safe operation. However, despite of lots of investigations conducted, a number of tasks remain unsolved to assess long term consequences of the leak from the liquid radwaste storage facility-2.

Since radiation safety requirements and rules are being reinforced day by day, and new sources of ^{60}Co intake are detected in the area of LRWS leakage effect and redistribution of activity

Шаров Д.А., Коротков А.С., Пырков И.В., Поваров В.П., Щукин А.П., Росновский С.В., Карасев В.Н., Росновский В.С. Обеспечение мониторинга подземных и поверхностных вод в районе размещения Нововоронежской АЭС с целью оценки последствий миграции радионуклидов из хранилища радиоактивных отходов (1985 г.) // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2023. Т. 5. Вып. 3. С. 291–297. DOI: 10.34753/HS.2023.5.3.291.

радиоактивных отходов из хранилища жидких отходов-2.

Так как требования и правила по радиационной безопасности ужесточаются с каждым днем, а в зоне влияния утечки жидких радиоактивных отходов обнаруживаются новые источники поступления ^{60}Co, а также происходит перераспределение активности донных отложений в р. Дон на участках локализации радиоактивного загрязнения. после последствий утечки в 1985 г. и характеристики загрязнения ^{60}Co донных отложений на этом участке указывают на возможность поступления данного радионуклида в реку Дон с берегового грунта, необходимо непрерывно проводить мониторинг гидросферы в районе размещения АЭС и поэтому существует потребность в новых методиках, программах по исследованию гидросферы. В связи с этим Нововоронежская АЭС разработала новую программу по радиационному дозиметрическому мониторингу реки Дон и береговой полосы до 2030 г.

Ключевые слова: жидкие радиоактивные отходы; радиационная безопасность; удельная активность; радиационный контроль; утечка; мониторинг.

of bottom sediments in the Don River at the sites of localization of radioactive contamination after leakage in 1985, continuous monitoring of the hydrosphere in the vicinity of the nuclear power plant location is required. Therefore, there is a need for new methods, programs on hydrosphere research. Thereby, a new program on radiation dosimetric monitoring of the Don river and water-front until 2030 were developed by Novovoronezh NPP specialists.

Keywords: liquid radioactive waste; radiation safety; specific activity; radiation monitoring; leakage; monitoring.

Введение

Развитие атомной энергетики сопровождается ужесточением регулирующих требований к обеспечению радиационной безопасности. При этом возникают задачи, связанные с контролем и локализацией отдаленных радиационных последствий эксплуатации или нарушений нормальной эксплуатации объектов использования атомной энергии в прошлом, в том числе связанных с загрязнением окружающей среды. Одна из таких задач – радиационный мониторинг зоны влияния утечки жидких радиоактивных отходов (ЖРО) из хранилища жидких отходов № 2 (ХЖО-2) Нововоронежской АЭС (НВАЭС), произошедшей в 1985 г. [Щукин, 2007]. Инцидент привел к радиоактивному загрязнению грунта и грунтовых вод, при этом перенос радионуклидов с грунтовыми водами из места утечки способствовал радиоактивному загрязнению водных объектов, находящихся в зоне влияния утечки, в результате разгрузки (выхода в поверхностные водоемы, в частности, в реку Дон) загрязненных радионуклидами грунтовых вод. Со временем происходило перераспределение радионуклидов между взвешенными в воде частицами и донными отложениями, их накопление в донных отложениях, а также перенос течением воды. Перечисленные факторы способствовали перераспределению активности радионуклидов в донных отложениях и изменению границ загрязненных радионуклидами участков.

Sharov D.A., Korotkov A.S., Pyrkov I.V. Povarov V.P., Shchukin A.P., Rosnovsky S.V., Karasev V.N., Rosnovsky V.S. Hydrosphere monitoring in the area of Novovoronezh NPP location in order to assess consequences of radionuclide migration from the LRWS-2 (1985). *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2023, vol. 5, iss. 3, pp. 291–297. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2023.5.3.291.

Методы

Для получения детальной информации о радиационном состоянии участка радиоактивного загрязнения в зоне влияния утечки ЖРО из ХЖО-2 НВАЭС, выявления тенденций (кратковременного и долговременного характера) его изменения во времени, а также обоснования целесообразности проведения дополнительных защитных мероприятий, выработки рекомендаций по совершенствованию регламента радиационного контроля (РК) данного участка, с 2001 г. силами компетентных научных организаций (АО «ВНИИАЭС», ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, НПО «Тайфун») в дополнение к регламенту РК НВАЭС в соответствии с утвержденной долгосрочной Программой[1] проводились специальные работы по радиационному мониторингу загрязненных участков.

Методика основана на пробоотборе с последующей гамма-спектрией, а также гамма-мониторинге дна погружным прибором типа «Нырок-ППД».

Работы выполнялись с применением прецизионных методов и средств измерений, а также численных моделей фильтрации и миграции радионуклидов в места разгрузки загрязненных подземных вод. При выполнении полевых работ решались следующие задачи:

– выявление объектов с повышенным содержанием радионуклидов (участки грунта, донных отложений поверхностных водоемов, подземные и поверхностные воды) методами поисковой радиометрии и дозиметрии;

– отбор проб грунта и донных отложений в сети контрольных точек на местности и в водоемах (река Дон, сбросной канал первой очереди НВАЭС, отводной канал на рыбное хозяйство) и анализ радионуклидного состава загрязнения и удельной активности радионуклидов;

– контроль удельной активности радионуклидов в грунте и донных отложениях на протяженных участках методом неразрушающей гамма-спектрометрии, в том числе с применением погружного гамма-спектрометра высокого разрешения;

– отбор проб поверхностных вод и анализ радионуклидного состава загрязнения и удельной активности радионуклидов для выявления мест разгрузки загрязненных грунтовых вод;

– отбор проб грунтовых (подземных) вод из сети наблюдательных скважин и анализ радионуклидного состава загрязнения и удельной активности радионуклидов для выявления путей миграции радионуклидов;

– оконтуривание, в случае выявления, участков локального радиационного загрязнения (ЛРЗ) грунта и донных отложений;

– установление распределения активности радионуклидов по вертикальному профилю грунта на исследуемых участках;

– оценка запаса техногенных радионуклидов в донных отложениях на участках ЛРЗ и общего запаса данных радионуклидов на участках исследования;

– отлов и определение содержания радионуклидов в рыбе из р. Дон для последующей оценки дозовой нагрузки на критическую группу населения (рыбаки);

– выявление динамики изменения радиационного состояния контролируемых объектов во времени.

В ходе выполнения работ по радиационному мониторингу зоны влияния утечки из ХЖО-2 разработан и с 2008 г. применяется при выполнении полевых работ метод неразрушающего (дистанционного) радиационного контроля донных отложений на основе погружной гамма-спектрометрической системы «Нырок-ППД» (разработка АО «ВНИИАЭС» и ООО «Грин Стар Инструментс»), позволяющий получать репрезентативную картограмму удельной активности радионуклидов в загрязненных донных отложениях (рисунок 1).

[1] Программа по научно-методическому сопровождению радиационного контроля участка радиоактивного загрязнения в районе 1,2 блоков и ХЖО-2 Нововоронежской АЭС на период 2010–2025 гг., утв. заместителем генерального директора - техническим директором ОАО «Концерна «Росэнергоатом» (23.09.2008)
Programma po nauchno-metodicheskomu soprovozhdeniiu radiatcionnogo kontrolia uchastka radioaktivnogo zagriazneniia v rai`one 1,2 blokov i KHZHO-2 Novovoronezhskoi` AE`S na period 2010–2025 gg., utv. zamestitelem general`nogo direktora - tekhnicheskim direktorom OAO «Kontcerna «Rose`nergoatom» (23.09.2008).

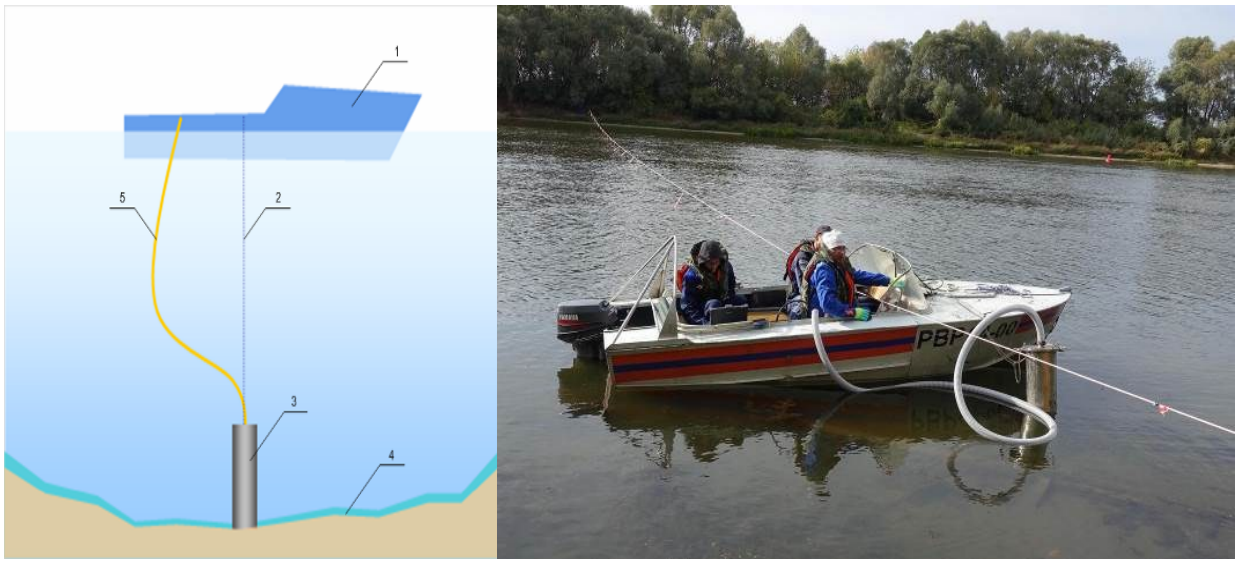


Рисунок 1. Схема измерения активности донных отложений неразрушающим методом:
1 – плавсредство; 2 – трос; 3 – блок детектирования в капсуле; 4 – дно водоема (реки);
5 – вентиляционный шланг

Figure 1. Scheme for bottom sediment activity measurement by non-destructive method:
1 – watercraft; 2 – rope; 3 – encapsulated detection unit; 4 – water reservoir bottom (epy river);
5 – ventilation hose

Результаты и обсуждение

За годы исследований в ходе выполнения расчетных и полевых экспериментальных работ по радиационному мониторингу зоны влияния утечки из ХЖО-2 были получены следующие основные результаты:

– выявлены причины и оценен масштаб инцидента на НВАЭС, проведена оценка выхода радионуклидов из ХЖО-2 в грунтовые воды;

– выявлены основные характеристики радиоактивного загрязнения окружающей среды;

– разработаны и апробированы расчетно-теоретические модели распространения различных физико-химических форм ^{60}Co и ^{137}Cs с грунтовыми и поверхностными водами с учетом гидрогеологических и геохимических особенностей района расположения НВАЭС;

– выявлены основные пути и особенности миграции ^{60}Co в грунтовых водах, а также места поступления этого радионуклида в р. Дон на основе расчетно-теоретических работ;

– разработан оптимальный метод радиационного контроля грунтовых вод, позволяющий выполнять достоверное измерение активности радионуклидов в подземной воде с нижним пределом измерений около 0,05 Бк/кг;

– показано, что годовая доза облучения критической группы населения (рыбаки) в результате утечки ЖРО из ХЖО-2 за все время наблюдения не превышала минимально значимую дозу (10 мкЗв/год)[2].

– проведена оценка радиационно-гигиенической обстановки в прибрежных районах р. Дон;

– выполнены оценки эффективности природных защитных барьеров на пути миграции ^{60}Co в р. Дон;

– разработан и реализован на основе полученных данных комплекс мероприятий по реабилитации радиоактивно загрязненной территории и оценена их эффективность, а также даны исчерпывающие ответы на запросы контрольных и надзорных органов.

Результаты исследований использованы для обоснования безопасности при эксплуатации объектов Нововоронежской и других АЭС.

Несмотря на большой объем проведенных исследований, остается нерешенным ряд задач по

[2] Минимально значимая доза – нижняя граница дозы облучения при оптимизации радиационной защиты населения в режиме нормальной эксплуатации АЭС.

оценке отдаленных последствий утечки ЖРО из ХЖО-2

В период с 2003 по 2016 гг. в грунтовой воде наблюдательных скважин эпизодически обнаруживался радионуклид ^{137}Cs ($T_{1/2}$ =30 лет) с удельной активностью до нескольких Бк/кг, что может указывать на возможную миграцию данного радионуклида. Современное содержание ^{137}Cs за пределами ХЖО-2 составляет около 3,5 ТБк, предполагается, что активность сосредоточена в грунте под ХЖО-2.

Удельная активность ^{60}Co в донных отложениях на ряде участков в устье сбросного канала и отводном канале в направлении прудов рыбного хозяйства по результатам исследований в предыдущие годы (например, в 2016 г., соответственно, 17 и 28 кБк/кг) превышала предельное значение (10 кБк/кг), установленное[3] в для отнесения материалов к твердым радиоактивным отходам. Вследствие этого, необходимо дальнейшее продолжение периодического радиационного обследования донных отложений на участках исследования, в особенности на указанных выше участках.

Периодически в зоне влияния утечки ЖРО из ХЖО-2 обнаруживаются новые источники поступления ^{60}Co в р. Дон, а также перераспределение активности донных отложений в р. Дон на участках локализации радиоактивного загрязнения. Прогноз изменения поступления ^{60}Co в р. Дон может быть сделан только на основании расчетных и экспериментальных работ. Например, в 2018 г. обнаружен участок с повышенным содержанием ^{60}Co в донных отложениях вблизи береговой насосоной станции – 1 (БНС-1) в р. Дон (максимальное значение удельной активности ^{60}Co в донных отложениях достигало 1500 Бк/кг). По результатам специальных работ, выполненных в 2020 г.[4], отмечен рост удельной и общей активности ^{60}Co в донных отложениях на данном загрязненном участке (значения максимальной удельной активности ^{60}Co в 2020 и 2018 гг. – 1570 и 687 Бк/кг соответственно, запас активности ^{60}Co – 68 и 47,6 МБк соответственно). Характеристики загрязнения ^{60}Co донных отложений на этом участке указывают на возможность поступления данного радионуклида в р. Дон с берегового грунта. На рисунке 2 приведена гистограмма распределения удельной активности ^{60}Co по глубине донных отложений (по 5-сантиметровым слоям керна), отобранных на данном участке р. Дон, где черная пунктирная линия (***1***) – тенденция миграции нуклида из верхнего слоя в нижележащие слои, красная пунктирная линия (***2***) – тенденция выноса (вымывания) нуклида из верхних слоев с проточной водой реки Дон. Под номером ***3*** – распределение удельной активности нуклида по глубине с учетом неопределенности измерений, ***4*** – показано, какдва процесса (миграция, вымывание), накладываясь друг на друга, формируют распределение активности по глубине.

[3] Постановление Правительства РФ от 19.10.2012 № 1069 «О критериях отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным отходам, критериях отнесения радиоактивных отходов к особым радиоактивным отходам и к удаляемым радиоактивным отходам и критериях классификации удаляемых радиоактивных отходов»

Postanovlenie Pravitel`stva RF ot 19.10.2012 № 1069 "O kriteriiakh otneseniia tverdy`kh, zhidkikh i gazoobrazny`kh othodov k radioaktivny`m othodam, kriteriiakh otneseniia radioaktivny`kh othodov k osoby`m radioaktivny`m othodam i k udaliaemy`m radioaktivny`m othodam i kriteriiakh classifikatcii udaliaemy`kh radioaktivny`kh othodov" [On the criteria for classifying solid, liquid, and gaseous waste as radioactive waste, criteria for classifying radioactive waste as special radioactive waste and removable radioactive waste, and criteria for classifying removable radioactive waste]

[4] Д.А. Шаров, А.С. Коротков, И.В. Пырков и др. Отчет «Радиационная обстановка в зоне влияния утечки ЖРО из ХЖО-2 (1985 г.) НВАЭС в 2020 г.». М: АО «ВНИИАЭС», 2020

D.A. Sharov, A.S. Korotkov, I.V. Py`rkov i dr. Otchet “Radiatcionnaia obstanovka v zone vliianiia utechki ZHRO iz KHZHO-2 (1985 g.) NVAE`S v 2020 godu” [Report "Radiation Situation in the Influence Zone of the Leakage of Liquid Radioactive Waste from Liquid Radioactive Waste Storage Facility-2 (1985) of Novovoronezh NPP in 2020.] M: AO «VNIIAE`S», 2020

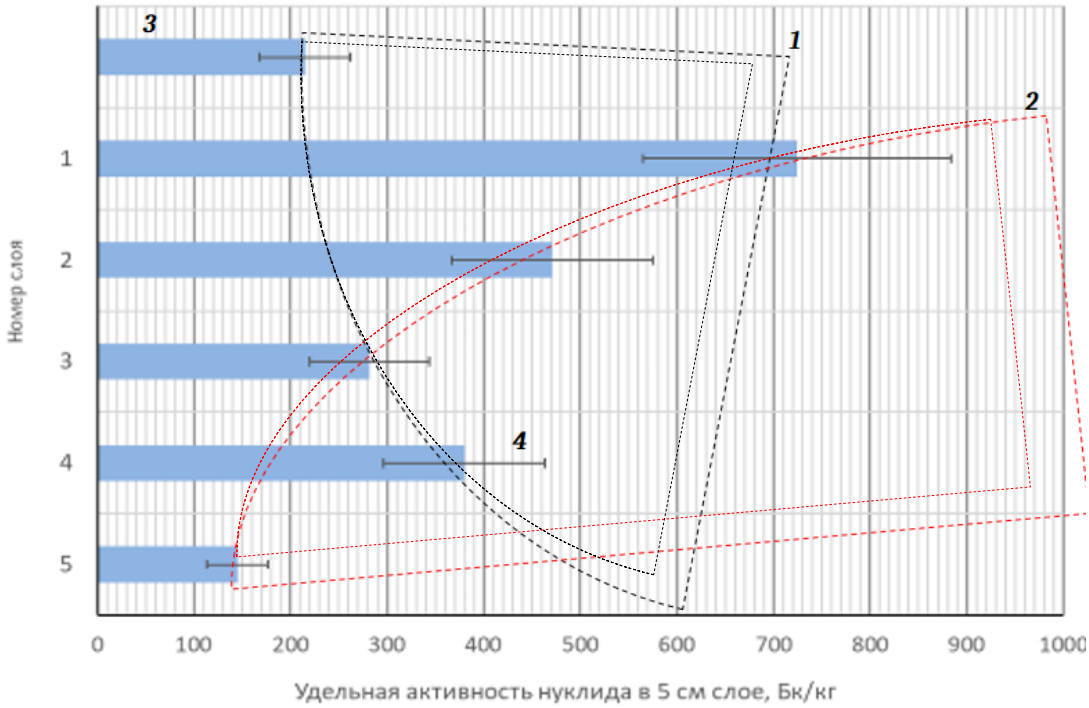


Рисунок 2. Содержание радионуклида ^{60}Co в слоях керна донных отложений, отобранного на участке № 1а исследования в створе № 28 в 5 м от левого берега р. Дон в 2020 г.

Figure 2. Content of radionuclide ^{60}Co in the bottom sediment layers sampling point, sampled at section No. 1a of the cross section No. 28 5 m from the left bank of the Don River in year 2020



Рисунок 3. Участок исследований в р. Дон перед каменной насыпью БНС-4 НВАЭС (вид с плавсредства)

Figure 3. Research site in the Don River in front of the stone rip-rap fill of the NVNPP on-shore pumping station-4 (view from a watercraft)

Также в 2020 г. подтверждена тенденция к накоплению ^{60}Co в донных отложениях вблизи каменной насыпи перед береговой насосоной станции–4 (БНС-4) НВАЭС и смещению накопленной активности в направлении русла реки. В целях обеспечения радиационной безопасности при эксплуатации БНС-4 НВАЭС представляется целесообразным проведение детального исследования радиационных характеристик данного участка (рисунок 3) и выполнение прогнозных оценок изменения радиационной обстановки во времени с целью принятия обоснованных и своевременных решений о необходимости проведения защитных мероприятий.

Закючение

Оставшиеся нерешенные проблемы, а также необходимость подтверждения безопасной радиационной обстановки для диалога с надзорными органами и общественностью делают актуальным продолжение работ по научно-методическому сопровождению радиационного контроля на участке радиоактивного загрязнения, образовавшемся вследствие утечки ЖРО из ХЖО-2 С учетом вновь выявленных задач с целью непрерывного наблюдения за радиационным состоянием загрязненного участка разработана и утверждена новая Программа радиационного дозиметрического мониторинга реки Дон и береговой полосы до 2030 г.[5].

Литература

Щукин А.П. Расчетно-теоретические и экспериментальные исследования закономерностей загрязнения окружающей среды в результате утечки радионуклидов из хранилища жидких радиоактивных отходов (на примере Нововоронежской АЭС). Автореф. дисс. … канд. техн. наук. М., 2007. 20 с.

References

Shchukin A.P. *Raschetno-teoreticheskie i e`ksperimental`ny`e issledovaniia zakonomernostei` zagriazneniia okruzhaiushchei` sredy` v rezul`tate utechki radionuclidov iz khranilishcha zhidkikh radioaktivny`kh othodov (na primere Novovoronezhskoi` AE`S). Avtoref. diss. kand. techn. nauk [Calculative-Theoretical and Experimental Studies on Environmental Pollution Patterns Due to Leakage of Radionuclides from Liquid Radioactive Waste Storage: (Case Study of Novovoronezh NPP)]. Ph. D. (technical) thesis]*. M, 2007. 20 p. (In Russian).

[5] Программа Радиационного дозиметрического мониторинга участков р. Дон и береговой полосы в районе расположения Нововоронежской АЭС на период 2023 – 2030 гг., утв. заместителем генерального директора – директором филиала АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская АЭС» (17.01.2023). Programma Radiatcionnogo dozimetricheskogo monitoringa uchastkov r. Don i beregovoi` polosy` v rai`one raspolozheniia Novovoronezhskoi` AE`S na period 2023 – 2030 gg. [The Radiation Dosimetric Monitoring Program for the areas of the Don River and the coastal zone near the Novovoronezh Nuclear Power Plant for the period of 2023-2030] (17.01.2023).

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

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

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

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

Общие требования к оформлению статьи:

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

Титульная страница должна содержать следующие элементы:

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

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

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

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

Единицы измерения по тексту статьи указываются в международной системе единиц.

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

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

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

В конце статьи могут быть приведены **Благодарности**, в котором следует упоминать людей, которые помогали при работе над статьей; источники финансирования.

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. Global and regional changes of nature and climate
9. Scientific discussions
10. Heritage
11. Chronicles

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

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

The general format requirements for articles to be published:

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

The title page should contain the following elements:

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

The main text.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Cite references 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.

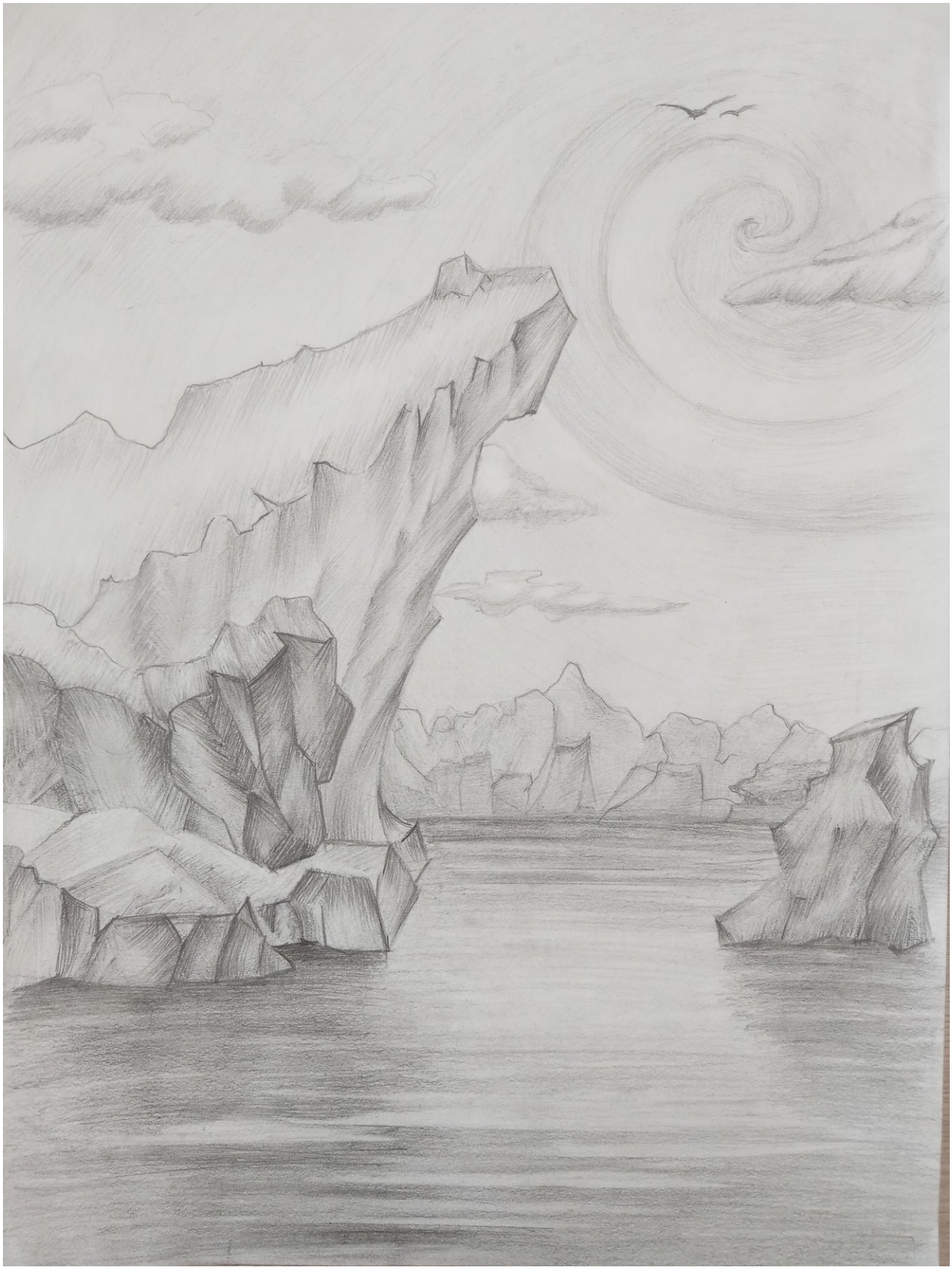
Научное издание

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

Главный редактор: академик РАН Г.И. Долгих
Компьютерная верстка: О.Ю. Круковская
На обложке фото В.П. Благовещенского
рисунки Е. Загадской, Д. Петровской
Подписано в печать 10.12.2023. Формат: 60x84/8
Бумага: офсетная. Печать плоская Усл. печ. л. 19,2. Тираж 50 экз. Заказ № ____
Выход в свет __.__.2023
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



Петровская Дарья. *Лагуна*



© 2023. «Гидросфера. Опасные процессы и явления». Все права защищены