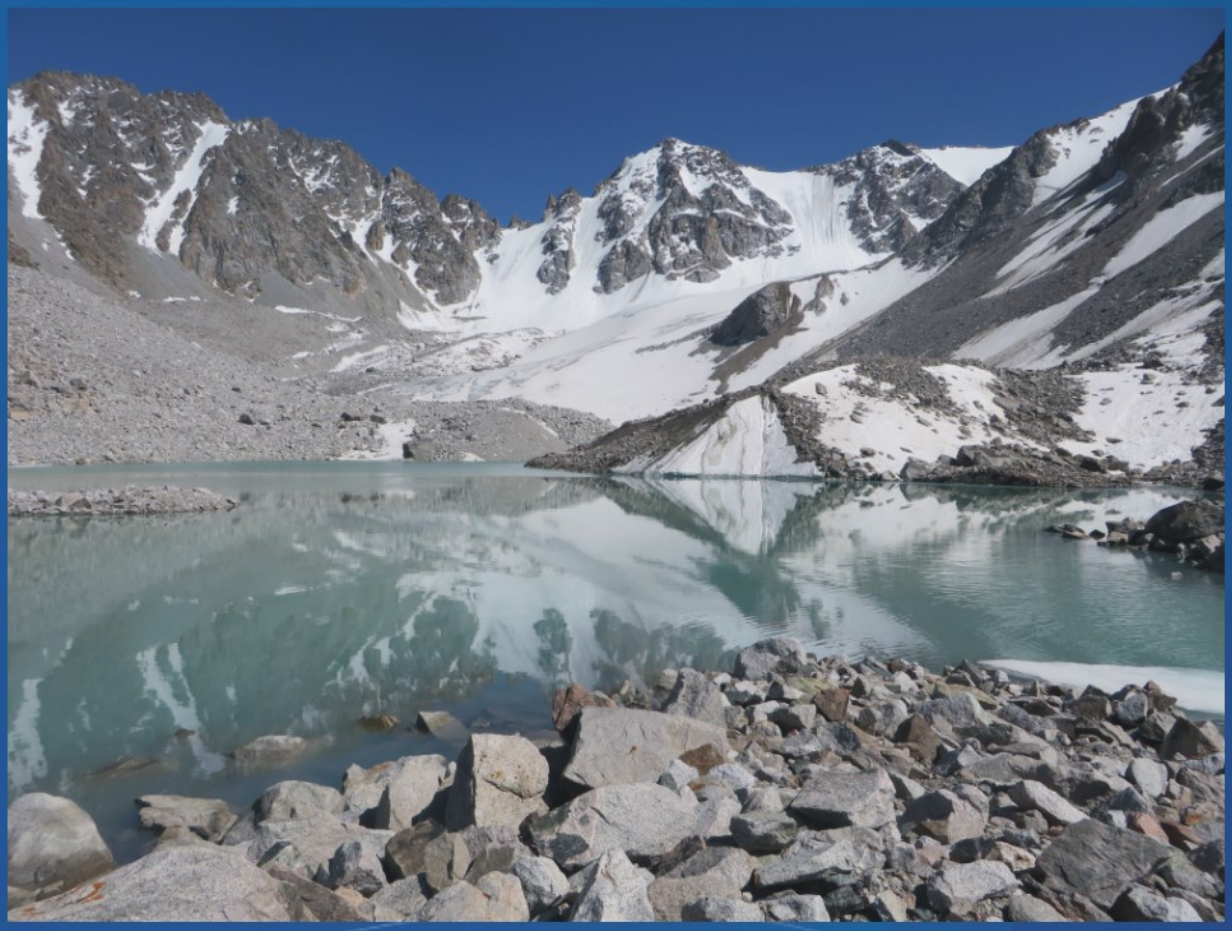
ISSN: 2686-7877 (print)
2686-8385 (online)

ГИДРОСФЕРА

ОПАСНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ



www.hydro-sphere.ru

Том 6 Выпуск 1



Прищепа Кирилл. *Негостеприимная буха*

ГИДРОСФЕРА. ОПАСНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ

Том 6, Выпуск 1

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 6, Issue 1

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)

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)

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 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.

Издание включено в **«Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук»** по специальностям (отраслям):
1.6.7. Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение (Геолого-минералогические)
1.6.8. Гляциология и криология Земли (Географические)
1.6.12. Физическая география и биогеография, география почв и геохимия ландшафтов (Географические)
1.6.14. Геоморфология и палеогеография (Географические)
1.6.16. Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия (Географические)
1.6.17. Океанология (Физико-математические)
1.6.18. Науки об атмосфере и климате (Географические)
1.6.21. Геоэкология (Географические)
2.1.6. Гидротехническое строительство, гидравлика и инженерная гидрология (Технические)
4.3.4. Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины (Технические)

ИЗДАТЕЛЬСТВО:
ООО НПО «Гидротехпроект»
АДРЕС РЕДАКЦИИ:
г. Санкт-Петербург, 14-я линия В.О. д. 97 пом. 3н
Для почтовых отправлений: 199155, г. Санкт-Петербург, а/я 136 Редакция журнала «Гидросфера. Опасные процессы и явления» Тел. +7(812)313-83-48, e-mail: info@hydro-sphere.ru

Technical editor

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

PUBLISHING:
Scientific Production Association «Gidrotechproekt»
EDITORIAL ADDRESS:
Russia, Saint-Petersburg, 14th line of Vasilyevsky Island, 97 of. 3n. For corresponding: 199155 Russia, Saint-Petersburg, PO Box 136. Editorial Board of the «Hydrosphere. Hazardous processes and phenomena» Tel. +7(812)313-83-48, e-mail: info@hydro-sphere.ru

СОДЕРЖАНИЕ

ОПАСНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ГИДРОСФЕРЕ: ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ИНЖЕНЕРНЫЕ АСПЕКТЫ 8

Особенности типизации опасных гидрологических событий в устьях рек на примере Роны и Эбро М. В. Исупова, М. В. Михайлова 8

Результаты оценки эффективности донной плотины, построенной для повышения минимальных зимних уровней на реке Сухоне и озере Кубенском А. В. Белый 22

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ И ОПАСНОСТИ В ГИДРОСФЕРЕ 35

Урбоклиматические проекты для предотвращения чрезвычайных ситуаций в водоснабжении мегаполисов В. Н. Безносов, А. Л. Суздалева..... 35

Изучение фильтрационных свойств барьеров безопасности для захоронения радиоактивных отходов на примере глиноземистого бетона М. А. Царев, И. Ю. Лободенко, А. А. Малофеев, Н. Е. Ерёмина, А. Б. Ермолинский, М. С. Чернов, Е. Н. Самарин, А. П. Пензев 52

МЕТОДЫ, МОДЕЛИ И ТЕХНОЛОГИИ 76

Разработка стенда для определения потребной толщины многослойных дорожных одежд лесных дорог А. Р. Бирман, О. В. Зубова, С. А. Угрюмов..... 76

Оценка значений прочностных характеристик грунта при нелинейной зависимости его сопротивления сдвигу от нормального давления А. Ю. Виноградов, В. А. Обязов ... 83

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ 97

CONTENTS

HAZARDOUS PROCESSES IN THE HYDROSPHERE: FUNDAMENTAL AND ENGINEERING ASPECTS 8

Peculiarities of typication of dangerous hydrological events at river mouths, the Rhone and Ebro as examples Maria V. Isupova, Maria V. Mikhailova 8

Results of evaluation of the efficiency of hydrotechnical facilities built to increase minimum winter levels on the Sukhona river and lake Kubenskoye Anatoly V. Bely 22

ECOLOGICAL PROBLEMS AND HAZARDS IN THE HYDROSPHERE 35

Urbanization climate actions to prevent emergencies in the water supply of megacities Viktor N. Beznosov, Antonina L. Suzdaleva 35

Investigation of safety barriers filtration properties for radioactive waste disposal on the alumina concrete example Mikhail A. Tsarev, Ivan Yu. Lobodenko, Alexey A. Malofeev, Nadezhda E. Eremina, Andrey B. Ermolinsky, Mikhail S Chernov, Eugene N. Samarin, Anton P. Penzev 53

METHODS, MODELS AND TECHNOLOGIES 76

Designing of a stand for determining the required thickness of multilayer road coverings of forest roads Alexey R. Birman, Oksana V. Zubova, Sergey A. Ugryumov 76

Estimation of the values of the strength characteristics of the soil with a nonlinear dependence of its shear resistance on normal pressure Alexey Yu. Vinogradov, Viktor A. Obyazov 83

AUTHORS GUIDELINE 97

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

УДК 551.428.6 DOI: 10.34753/HS.2024.6.1.8

ОСОБЕННОСТИ ТИПИЗАЦИИ ОПАСНЫХ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ В УСТЬЯХ РЕК НА ПРИМЕРЕ РОНЫ И ЭБРО

М.В. Исупова, М.В. Михайлова
Институт водных проблем РАН, г. Москва, Россия
misupova@yandex.ru

Аннотация. Устья рек сильно уязвимы к повышению уровня моря, связанному с глобальными изменениями климата, усилению штормовых нагонов, морского волнения, сопровождающихся абразией морских берегов и затоплением обширных дельтовых территорий. Поэтому опыт исследований опасных гидрологических событий речного и морского происхождения в устьях рек необходим и полезен для разработки критериев оценки опасности таких событий и их комплексной типизации. На примере крупных дельт Средиземноморского региона (Роны и Эбро) показано, что несмотря на довольно хорошую изученность подобных событий в этих устьях, нет их общей принятой типизации, а для одного и того же объекта приведены разные классификации. Опасные гидрологические события в устьях Роны и Эбро разными исследователями подразделяются как по генетическому признаку (происхождению осадков), так и по величине расходов воды, повторяемости и продолжительности наводнений, оценке воздействия на окружающую среду и жизнь человека. Опасные гидрологические события в исследуемых устьях также рассмотрены с точки зрения типизации, разрабатываемой авторами. Отмечается, что для

PECULIARITIES OF TYPICATION OF DANGEROUS HYDROLOGICAL EVENTS AT RIVER MOUTHS, THE RHONE AND EBRO AS EXAMPLES

Maria V. Isupova, Maria V. Mikhailova
Water Problems Institute of RAS, Moscow, Russia
misupova@yandex.ru

Abstract. River mouths are highly vulnerable to sea level rise associated with global climate change, strengthening storm surges, and wave action, accompanied by abrasion of seacoasts and flooding of vast deltaic areas. Therefore, experience in studying dangerous hydrological events of river and sea origin at river mouths is necessary and useful for developing criteria for assessing the danger of such events and their comprehensive typification. Using the example of large deltas of the Mediterranean region (Rhone and Ebro), it is shown that despite a rather good study of such events at these river mouths, there is no generally accepted typification, and different classifications are given for the same object. Dangerous hydrological events at the mouths of the Rhone and Ebro rivers are subdivided by different researchers both according to genetic characteristics (the origin of precipitation) and water discharge values, frequency and duration of flood, assessment of the impact on the environment and human life. Dangerous hydrological events at the studied mouths are considered from the point of view of the typification, developted by the authors. It is noted that among the dangerous hydrological events in the Rhone and Ebro deltas the most typical are fluvial, storm surge, fluvial-storm surge, fluvial-pluvial floods, as well as dangerous droughts.

Isupova M. V., Mikhailova M. V. Peculiarities of typication of dangerous hydrological events at river mouths, the Rhone and Ebro as examples. *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2024, vol. 6, iss. 1, pp. 8–21. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2024.6.1.8.

дельт Роны и Эбро среди опасных гидрологических событий наиболее характерны стоковые, нагонные, стоково-нагонные, стоково-дождевые наводнения, а также опасные маловодья.

Ключевые слова: река; море; устьевая область; дельта; Рона; Эбро; наводнение; опасное гидрологическое событие; типизация.

Keywords: river; sea; mouth area; delta; Rhone; Ebro; flood; hazardous hydrological event; typification.

Введение

Начиная с середины XX в. потепление климата планеты существенно повлияло на процессы в атмосфере и гидросфере: усилилось таяние ледников и многолетнемерзлых пород, ускорилось повышение уровня Мирового океана, активизировалась циклоническая деятельность, более частыми стали сильные затопления речного и морского происхождения. Среди географических объектов, наиболее уязвимых к воздействию указанных выше процессов, оказались устьевые области рек. Этому способствуют особенности их строения и режима: низменные берега, разветвленная гидрографическая сеть, подверженность одновременно и речному, и морскому влиянию. Проблемы изучения и оценки опасного воздействия водного фактора на природную среду и социально-экономический комплекс устьев рек, приобрели в настоящее время особую актуальность.

Прогнозируемое повышение уровня моря на 0,16–0,28 м к 2050 г. и 0,34–1,05 м к 2100 г. [IPCC. Climate Change, 2021] приведет к усилению затопления низменных районов речных дельт. На гидролого-морфологические процессы в дельтах будут оказывать влияние относительное повышение уровня моря, складывающееся из эвстатического повышения уровня и просадки дельтовых отложений, а также усиление штормовой деятельности. Так, например, в Средиземноморском регионе в последнее время участились интенсивные ураганы – медиканы, вызывающие сильные штормовые нагоны и оказывающие существенное влияние на гидролого-морфологические процессы в устьевых областях Роны и Эбро [Sanuy et al., 2020].

Цель настоящей статьи – проанализировать опасные гидрологические события (ОГС) в некоторых устьях рек Средиземноморского региона, выявить особенности и сравнить типизации ОГС, имеющиеся в российской и зарубежной научной литературе.

Этот научный обзор сделан в рамках исследования экстремальных гидрологических явлений в устьях рек в Институте водных проблем РАН. Опасные гидрологические процессы в устьях рек мира изучены недостаточно: мало первичных сведений о них, крупных работ по их систематизации, анализу и обобщениям; слабо разработана классификация этих процессов. К числу немногих опубликованных работ, рассматривающих опасные устьевые гидрологические процессы, можно отнести [Магрицкий, 2016; Михайлов, Михайлова, Магрицкий, 2018].

Крупнейшие дельты рек Средиземноморья – Роны (Франция), Эбро (Испания), По (Италия) и Нила (Египет) – объекты пристальных исследований, поскольку оказываются очень уязвимы к повышению уровня моря и усилению штормовых нагонов, морского волнения, сопровождающихся абразией морских берегов и затоплением обширных дельтовых территорий [Lorente et al., 2021]. Несмотря на то, что ландшафты этих дельт сильно изменены деятельностью человека, здесь расположены самые большие прибрежные естественные водно-болотные угодья на Средиземноморском побережье [Rodrigues-Santalla, Navarro, 2021].

Для устранения негативных последствий наводнений, особенно в густонаселенных районах Средиземноморья, созданы государственные учреждения для регистрации опасных событий и причиненного ими ущерба,

организации возмещения потерь, получения помощи жертвам и определения финансовых ресурсов для решения чрезвычайных ситуаций (введение новых или усиление существующих налогов). Исторические архивы Испании, Франции, Италии содержат различную информацию о наводнениях, как достаточно надежную (административные источники), так и частную (хроники, дневники) менее надежную, но предоставляющие полезную дополнительную информацию [Barriendos, Rodrigo, 2006; Pichard et al., 2017].

Объекты, методы и материалы исследований

Краткие сведения об объектах исследований

Согласно гидролого-морфологической типизации устьевых областей рек [Михайлов, Горин, 2012], устьевая область Роны относится к дельтово-эстуарной, устьевая область Эбро – к дельтовой. Каждая из исследуемых устьевых областей имеет в своем составе устьевой участок реки, дельту выдвижения и устьевое взморье; устьевая области Роны имеет также водоемы эстуарного типа – лагуны.

Дельта Роны. Дельта Роны площадью 1740 км^2 расположена на французском побережье Средиземного моря, приблизительно в 40 км к западу от Марселя (рисунок 1). В вершине дельты (ВД) чуть выше г. Арль, в районе нас. пункта Фурке (в 47,5 км от моря) река делится на два рукава: левый и главный – Большая Рона (Б. Рона) и правый – Малая Рона (М. Рона). Длина Б. Роны ~50 км, М. Роны − ~60 км, морского края дельты (МКД) – 90 км [Михайлова, Исупова, 2006; Isupova, Mikhailova, Dolgopolova, 2022]. Бóльшую часть дельты Роны занимает древняя и современная пойма (72 % площади дельты), на лагуны и пруды приходится 23 %, на прибрежные участки – 5 % [Arnaud-Fassetta, Quisserne, Antonelli, 2003]. Б. и М. Рона делят дельту на три части: Малый Камарг (западную), Большой Камарг (центральную) и Гран-План-дю-Бург (восточную). Большой Камарг в свою очередь делится на Северный Камарг (система осохших водотоков и осолоненных маршей) и Южный Камарг, отличительная черта которого – наличие

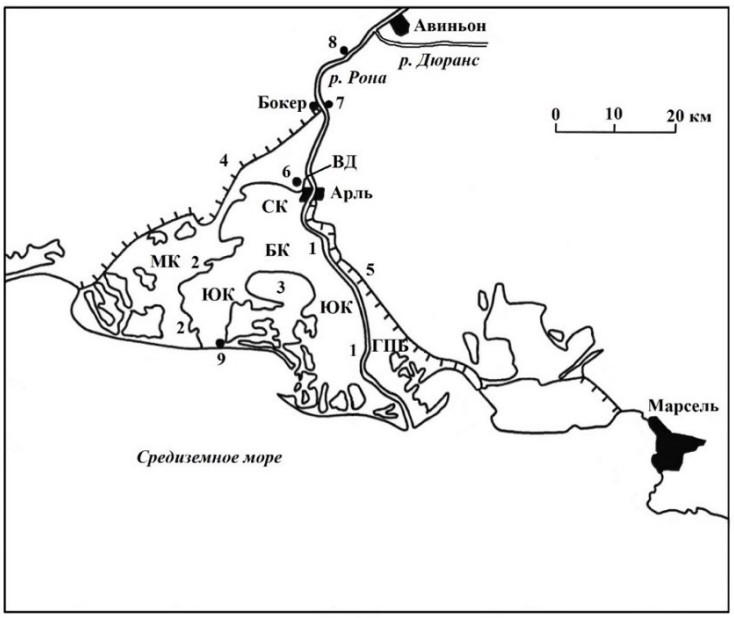


Рисунок 1. Схема устьевой области р. Рона. Рукава: 1 – Б. Рона, 2 − М. Рона; 3 – лагуна Ваккарес; навигационные каналы: 4 – Рона-Сет, 5 – Арль-Бук; части дельты: МК – Малый Камарг, БК – Большой Камарг, ГПБ − Гран-План-дю-Бург, СК – Северный Камарг, ЮК – Южный Камарг; города: 6 – Фурке, 7 – Тараскон, 8 – Арамон, 9 – Сент-Мари-де-ля-Мер

Figure 1. Scheme of the Rhone River mouth. Branches: 1 – G. Rhone, 2 – P. Rhone; 3 – Vaccares Lagoon; navigation canals: 4 – Rhone-Sète, 5 – Arles-Buc; parts of the delta: МК – Petite Camargue, БК – Grande Camargue, ГПБ - Grand Plane du Bourg, СК – Northern Camargue, ЮК – Southern Camargue; cities: 6 – Fourquet, 7 – Tarascon, 8 – Aramon, 9 – Sainte-Marie-de-la-Mer

бывших береговых валов, кос и солоноватых лагун, самая крупная из которых – Ваккарес (Этан-де-Ваккарес) площадью 64 км^2 [Pont, Day, Ibáñez, 2017].

Среднемноголетний расход воды Роны у г. Бокер (~12 км выше по течению от ВД и в 60,5 км от МКД) составляет 1700 м^3/с (годовой объем стока 53,7 км^3) [Arnaud-Fassetta, 2003a; Isupova, Mikhailova, Dolgopolova, 2022; Pont, Day, Ibáñez, 2017]. Максимальный годовой расход изменяется от 4200 до 11640 м^3/с, минимальный – до 320 м^3/с [Arnaud-Fassetta, 2003a]. Сток воды между рукавами распределяется следующим образом: 86 % (85−90 %) поступает в Б. Рону, 14 % (10−15 %) – в М. Рону [Arnaud-Fassetta, 2003a; Pichard et al., 2017]. Сведения о стоке наносов противоречивы, разными авторами оцениваются от 6,7 до 30,0 млн т/год [Arnaud-Fassetta, Quisserne, Antonelli, 2003; Isupova, Mikhailova, Dolgopolova, 2022], большую часть которого составляет сток взвешенных наносов.

Устьевое взморье Роны приглубое. Приливы полусуточные, максимальная величина ~0,4–0,5 м. Юго-западный ветер (марэн) способствует возникновению нагонов высотой до 1,0 м. При меженных расходах воды в ВД меньше 1000 м^3/с возможно проникновение в дельту осолоненных морских вод, дальность распространения которых составляет до 15 км в М. Роне и 35 км в Б. Роне [Arnaud-Fassetta, 2003a; Isupova, Mikhailova, Dolgopolova, 2022]

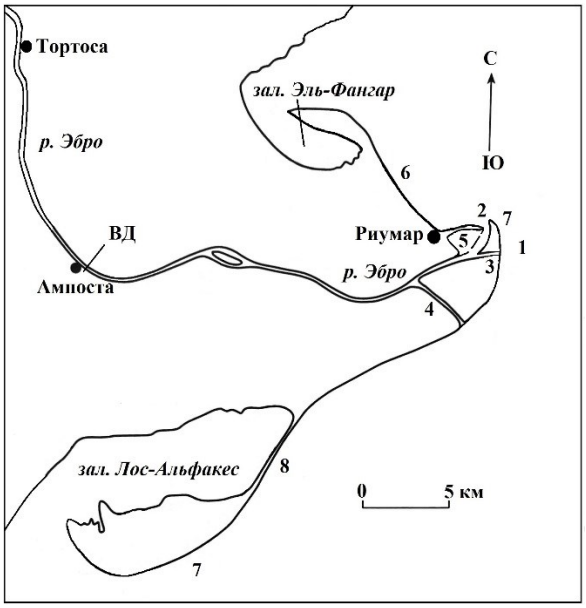


Рисунок 2. Схема устьевой области р. Эбро. 1 – мыс Тортоса; рукава: 2 – Эбро, 3 – Буда, 4 – Мигхорн; 5 – лагуна Эль-Гарсаль; устьевые косы: 6 – Фангар, 7 – Ла-Банья, 8 – Трабукадор

Figure 2. Scheme of the Ebro River mouth area. 1 – Cape Tortosa; branches: 2 – Ebro, 3 – Buda, 4 – Migjorn; 5 – El Garxal lagoon; mouth spits: 6 – Fangar, 7 – La Banya, 8 – Trabucador

История развития и освоения дельты Роны изложена в [Михайлова, Исупова, 2006]. Современная дельта Роны развивается под влиянием трех основных факторов: значительного антропогенного сокращения стока наносов в результате зарегулирования реки и обвалования русел, усиления воздействия интенсивных речных паводков и эвстатического повышения уровня моря.

Дельта Эбро. Дельта Эбро расположена на испанском побережье Средиземного моря, примерно в 170 км к югу-западу от Барселоны. Дельта площадью 320 км^2 имеет классическую клювовидную форму и оканчивается мысом Тортоса (рисунок 2). ВД Эбро находится в районе г. Ампоста в ~27 км от моря, длина МКД ~50 км. Выход в море главного и единственного рукава находится в районе нас. пункта Риумар. Слева и справа от дельты отходят большие устьевые косы Фангар и Ла-Банья, отделяющие от моря соответственно два залива-лагуны – Эль-Фангар (на севере) и Лос-Альфакес (на юге). Лагуны мелководные (средняя глубина от менее 0,5 до 1,0 м), имеют слабое сообщение с морем и получают пресную воду из главного рукава дельты и системы дренажных каналов. Самая

«молодая», частично заросшая, лагуна – Эль-Гарсаль – образовалась в 1937 г. после прорыва главного рукава дельты в северном направлении [Rodrigues-Santalla, Navarro, 2021]. Больше половины площади дельты (56 %) используется сельским хозяйством (главным образом под посевы риса), 15 % занято болотной растительностью, 20 % – песчаные пляжи, каналы, дороги, 9 % – лагуны и пресноводные марши.

Величина среднемноголетнего расхода воды Эбро у г. Тортоса (в замыкающем створе, в 47,8 км от МКД) за 1912−2018 гг. составляет 431 $м^3/с$ (3,8 $км^3$/год) [Tena, Vericat, Batalla, 2021], при этом до зарегулирования реки (1914–1935 гг.) расход был равен 592 $м^3/с$ (18,7 $км^3$/год), а после зарегулирования (1960–1990 гг.) уменьшился до 426 $м^3/с$ (13,4 $км^3$/год) [Михайлова, 2003] и ~300 $м^3/с$ (~9,47 $км^3$/год) в 2000–2020 гг. [Tena, Vericat, Batalla, 2021]. Наибольший расход воды реки оценивается в ~12000 $м^3/с$ (1907 г.) [Tena, Vericat, Batalla, 2021]. В конце XIX в. сток взвешенных наносов в устье составлял ~30 млн т/год. После зарегулирования реки и ее притоков 133 водохранилищами сток взвешенных наносов к 1910–1930 гг. сократился до 17–20 млн т/год, а после строительства в 1940–1950-х гг. крупных водохранилищ Эбро и Эса – до ~2,2 млн т/год. Введение в эксплуатацию водохранилищ Мекиненса, Рибарроха и Флиш еще сильнее сократило сток взвешенных наносов реки – до 0,15 млн т/год [Isupova, Mikhailova, Dolgopolova, 2022; Rodrigues-Santalla, Navarro, 2021].

Устьевое взморье Эбро приглубое. Приливы смешанные, причем преобладают полусуточные. Максимальная величина прилива ~0,25 м. Средняя высота нагонов 0,6 м. Дальность распространения приливов в дельту составляет 45 км, морских осолоненных вод – до 32 км [Isupova, Mikhailova, Dolgopolova, 2022; Rodrigues-Santalla, Navarro, 2021]. По приблизительным оценкам просадка дельтовых отложений в районе дельты Эбро составляет от 1 до 4 мм/год [Михайлова, 2003; Rodrigues-Santalla, Navarro, 2021], а относительное повышение уровня моря – 2–5 мм/год. Ветры восточных румбов вызывают сильный фронтальный подход волн к морскому краю, его последующий размыв и вдольбереговой перенос наносов к северу и югу.

Эволюция дельты Эбро подробно изложена в [Михайлова, 2003]. Современная дельта развивается под влиянием трех основных факторов: значительного антропогенного сокращения стока наносов реки, повышения уровня моря, активного волнового воздействия на морской край. Происходит деградация дельты, размыв ее МКД, наиболее интенсивный в районе мыса Тортоса и бара (пересыпи) Трабукадор [Rodrigues-Santalla, Navarro, 2021] (рисунок 2).

Методы и материалы исследований

Авторы статьи придерживаются определения, сформулированного в [Михайлов, Михайлова, Магрицкий, 2018]: «опасными гидрологическими процессами, событиями и явлениями надо считать те из них, которые оказывают или могут оказать негативное воздействие на население, населенные пункты, социальные и промышленные объекты, сельскохозяйственные угодья и фермы, инфраструктуру и другие хозяйственные объекты, а также окружающую природную среду и приводят или могут привести к социальному, материальному и экологическому ущербу».

Детальная типизация опасных гидрологических процессов и событий в устьях рек, принятая как в России, так и за рубежом, пока отсутствует. Причина – в большой сложности строения и гидрологического режима устьев рек. Кроме того, в условиях взаимодействия речных и морских факторов подходы к типизации опасных гидрологических процессов и событий, принятые для обычных рек и морей, к устьям рек, как правило, неприменимы.

При работе над статьей авторы придерживались научных подходов, изложенных в работах, касающихся опасных гидрологических процессов и событий в устьях рек [Магрицкий, 2016; Михайлов, Михайлова, Магрицкий, 2018]. В них предпринята попытка классифицировать опасные гидрологические события (явления, процессы) применительно к устьям. Так, например, к катастрофическим гидрологическим событиям (явлениям, процессам) в устьях рек отнесены те события, которые сопровождаются

человеческими жертвами, а к экстремальным – с наибольшими или наименьшими за весь период наблюдений значениями (исторический максимум или минимум), или за некоторый репрезентативный многолетний период. Отдельно выделены аномальные события – сильно отличающиеся от среднеарифметических или медианных величин (но не экстремальные). Типизация ОГС (явлений, процессов) должна, в свою очередь, учитывать определяющие факторы и характер воздействия на природный и социально-экономический комплекс устьев рек.

Одно из самых распространенных ОГС – это наводнение различной величины и генезиса. По [Магрицкий, 2016; Михайлов, Михайлова, Магрицкий, 2018], наводнения в устьях рек (и в дельтах, в частности) можно разделить на несколько типов: стоковые, заторные и зажорные, стоково-заторные и стоково-зажорные, морфодинамические, стоково-морфодинамические и стоково-заторно-морфодинамические, нагонные, стоково-нагонные, трансгрессивные, дождевые, наводнения при интенсивном снеготаянии, стоково-дождевые и др. По длительности воздействия выделяются наводнения очень длительные (крупномасштабные морские трансгрессии, сотни и тысячи лет), длительные (годы, десятилетия), сезонные и кратковременные, а по происхождению − речные, морские и вызванные местными атмосферными осадками. В иностранной литературе представлены классификации, применимые, как правило, к конкретным объектам. Для выявления особенностей типизации ОГС и, в частности, наводнений в устьях рек, авторы при подготовке статьи использовали различные базы данных и публикации, посвященные исследованию ОГС в дельтах Роны и Эбро.

Результаты

Опыт исследований и типизации опасных гидрологических событий в устьях Роны и Эбро

Согласно [Boudet, Sabatier, Radakokovitch, 2017], наводнения в низовье (участок реки от места впадения притока Изер до ВД) и дельте Роны различают по происхождению и делят на четыре основных типа: севенский (наводнения, вызванные сильными дождями на западных склонах Севенн), средиземноморский (сильные дожди на восточных склонах Южных Альп), океанический (продолжительные осадки в северной части водосбора Роны) и смешанный (к дождям добавляется таяние снега в горных районах водосбора). Наводнения первых двух типов продолжаются от нескольких часов до нескольких дней, третьего и четвертого – от нескольких дней до недель.

В [Arnaud-Fassetta, 2003a; Arnaud-Fassetta, Quisserne, Antonelli, 2003; Maillet et al., 2006] представлена классификация наводнений в низовье и дельте Роны в зависимости от повторяемости и критического значения расхода воды на г/п Бокер (1920–2000 гг.): 4200 м^3/с – ежегодное, 6000 – раз в два года, 8400 – раз в 10 лет, 9400 – раз в 30 лет (ноябрь 1994 г.), 9800 – раз в 50 лет (октябрь 1993 г.), 11000 – раз 80 лет (январь 1994 г.), 11300 – раз в 100 лет (май 1856 г.), 13300 – раз в 500 лет, 14200 м^3/с – раз в 1000 лет.

В исследованиях [Pichard et al., 2017] и базе данных HISTRHONE[1] Европейского центра исследований и развития наук об окружающей среде (Экс-ан-Прованс, Франция) приводится градация наводнений в низовье и дельте Роны от самых низких до самых высоких, начиная с паводков (без затопления пойменных и дельтовых территорий) и заканчивая «экстремальными» наводнениями. При этом учитывается морфологическое строение долины в низовье Роны (широкое пойменное расширение, особенно в дельте) и особенности разливов реки (сужение относительно устойчивого русла Роны в пределах городов и максимальное расширение разливов на пойменных участках Роны и в дельте). В целом же в базе содержатся исторические и современные данные об 1500 ОГС в низовье и дельте Роны (высоком или низком уровне воды, наводнениях, ледовых явлениях (ледоход, ледяные заторы), сильных дождях и засухах, нашествиях саранчи) и их негативном воздействии на хозяйство (ущербе городским и сельским районам и

[1] HISTRHONE, base de données historiques des crues et des inondations dans le bas Rhône. URL: https://histrhone.cerege.fr.

инфраструктуре), индексированные по времени, местоположению и нанесенному ущербу, которые охватывают период с 1226 по 2000 г. (включая Малый ледниковый период 1300–1850 гг.). Представленные в базе ОГС разделены на несколько разделов (модулей) – паводки и наводнения, ледовые явления, засухи, сильные дожди − и подразделяются на несколько типов [Pichard et al., 2017] (таблица 1). Согласно типизации [Михайлов, Михайлова, Магрицкий, 2018], для дельты Роны наиболее характерны стоковые, стоково-дождевые и стоково-нагонные наводнения и опасные обмеления.

При исследовании зафиксированных за 1300–2000 гг. 517 наводнений в низовье и дельте Роны отмечается увеличение частоты стоковых и стоково-дождевых наводнений типов C_2, C_3 и C_4 за последние три с половиной столетия, в основном за счет экстремальных наводнений C_4 в XIX–XX вв. (девять наводнений C_4 с 1300 по 1650 г. и 27 – с 1651 по 2000 г.) [Pichard et al., 2017].

В целом можно выделить периоды усиления ОГС в низовье и дельте Роны: 1350-х гг., 1450–1480-х гг., 1674–1711 гг., 1840–1841 гг., 1850-е гг., первая половина XX вв. На рубеже XX–XXI вв. в низовье и дельте Роны произошли шесть крупных наводнений – в октябре 1993 г. (9800 $м^3/с$ на г/п Бокер), в январе (10980 $м^3/с$) и ноябре 1994 г. (9750 $м^3/с$), ноябре 1996 г. (8990 $м^3/с$), сентябре (10500 $м^3/с$) и ноябре 2002 г. (10200 $м^3/с$) и декабре 2003 г. (11000±5 % $м^3/с$).

В испанской научной литературе среди ОГС рассматриваются, как правило, наводнения. Поскольку основные причины наводнений на средиземноморском побережье Испании, особенно в его северной части, – это проливные кратковременные конвективные или продолжительные обложные дожди (характерные для осеннего периода), типизация таких событий основана на трех видах прохождения дождевых осадков [Llasat et al., 2005]: (1) очень кратковременные (менее 6 ч), но высоко интенсивные дожди с небольшим общим количеством меньше 200 мм), (2) кратковременные (от 6 до 72 часов) интенсивные дожди с большим общим количеством (200–500 мм), с которыми связаны наиболее частые и катастрофические наводнения в регионе), (3) продолжительные (примерно 1 неделя) слабо интенсивные дожди (с возможными пиками) с общим количеством осадков от 200 мм (обычно происходят осенью или зимой). С точки зрения серьезности воздействия на окружающую среду и жизнь человека в [Barriendos, Rodrigo, 2006] наводнения делятся на катастрофические (со значительным ущербом или разрушением инфраструктуры) и чрезвычайные (с некоторым ущербом), а пространственного распространения – на крупные катастрофические (охватывающие два–три речных бассейна) и очень крупные катастрофические (охватывающие четыре и более речных бассейна) [Barriendos, Rodrigo, 2006]. В [Lorente et al., 2021] ОГС в устье реки классифицируется как экстремальное, когда один или несколько взаимосвязанных факторов (ветер, волны, морские течения, уровень моря) постоянно превышают определенные пороговые значения.

Согласно принятой авторами настоящей статьи типизации ОГС, для дельты Эбро наиболее характерны стоково-дождевые, стоковые, нагонные и стоково-нагонные наводнения, а также опасные маловодья. Среди наводнений на северо-востоке Испании (Каталония) в бассейнах 17 рек за период с 1355 г. по конец XX в. зарегистрировано 1422 наводнения (589 катастрофических и 833 чрезвычайных) [Barriendos, Rodrigo, 2006]. В низовье Эбро (г. Тортоса) и ее дельте – 17 катастрофических и 23 чрезвычайных наводнений (за 1355–1982 гг.). В последние годы среди ОГС выделяются нагонные и стоково-нагонные наводнения, вызванные осенними штормами в 2019 г. (сентябрь, октябрь), штормами Глория в январе 2020 г. и Филомена в январе 2021 г., которые нанесли дельте Эбро существенный ущерб [Rodríguez-Santalla, Navarro, 2021].

Примеры опасных гидрологических событий в устьях Роны и Эбро

В качестве наиболее показательных примеров ОГС в дельтах Роны и Эбро, отражающих их отнесение к какому-либо типу, ниже представлены наиболее значительные наводнения в низовьях и устьях этих рек.

Таблица 1. Опасные гидрологические события в низовье и дельте Роны, типизация по [Pichard et al., 2017] и ее сравнение с типизацией по [Михайлов, Михайлова, Магрицкий, 2018]
Table 1. Dangerous hydrological events in the Rhone lower reach and delta, typification according to [Pichard et al., 2017] and its comparison with typification according to [Mikhailov, Mikhailova, Magritsky, 2018]

Вид ОГС	Типизация ОГС по [Pichard et al., 2017]		Характеристика ОГС	Кол-во случаев	Типизация ОГС по [Михайлов, Михайлова, Магрицкий, 2018]
	событие	обозначение у авторов			
Засухи	маловодье	C_0	низкий уровень воды; до XIX в. в документальных источниках упоминался только экстремальный низкий уровень воды	235	стоковые маловодья
Наводнения	высокий уровень воды («Огромная Рона» («Gros Rhône»)	C_1	без затопления поймы, но при котором необходимо постоянное наблюдение за дамбами (документ. источники до XVIII в. за исключением 1783–1788 гг.)	445	стоковые наводнения; неблагоприятные
	высокий уровень воды с затоплением поймы	C_2	незначительное затопление поймы	263	стоковые, стоково-дождевые наводнения; выдающиеся
	наводнения	C_3	разрушительные наводнения средней степени (между C_2 и C_4); оцениваются в зависимости от ущерба	145	стоковые, стоково-дождевые наводнения; разрушительные
	экстремальные, катастрофические наводнения	C_4	обширные затопления, в том числе городов, разрушение дамб, мостов, дорог, повреждение сельскохозяйственных земель, гибель скота, жертвы среди населения	36	стоковые, стоково-дождевые наводнения; катастрофические
	слабые наводнения	Cd	неразрушительные наводнения (затопление поймы зафиксировано)	72	стоковые наводнения; малоопасные
	наводнения неопределенной силы	Ci	неразрушительные наводнения (затопление поймы не зафиксировано)	58	стоковые наводнения; малоопасные
ОГС, вызванные ледовыми явлениями	ледяной затор	GA	блокирование русла льдом	101	стоково-заторные наводнения
	ледоход	GF	движущийся лед	61	–
	скопления льда	Gi	отдельное скопление льдин	12	–
ОГС, вызванные сильными дождями и штормами	дождевое наводнение	IP	быстроразвивающийся дождевой паводок с затоплением поймы	48	дождевые, стоково-дождевые наводнения
	штормовой нагон	SM	проникновение морских вод	8	нагонные, стоково-нагонные наводнения

Стоково-дождевое наводнение в дельте Роны в 1993 г. Кратковременные и обильные осадки, выпавшие на водосборах притоков Роны – Ардеша и Дюранса в начале октября 1993 г., усугубившиеся последующими затяжными дождями в северной части бассейна Роны и короткими, но сильными грозами в Средиземноморском регионе, вызвали быстрый рост расходов воды в верховье Роны (2718 м^3/с 9 октября) и большинства ее притоков – Соны,

Изера, Ардеша и Дюранса. Совместное действие этих паводков привели к быстрому росту расходов воды в ВД Роны (до 9450 м^3/с 9 октября) и резкому повышению уровня воды [Pont, Day, Ibáñez, 2017]. Наводнение стоково-дождевого подтипа (или смешанного типа согласно [Boudet, Sabatier, Radakokovitch, 2017]) вызвало прорывы в защитной дамбе на М. Роне и разрушение берегов, при этом максимальный расход через прорывы оценивался в 614 м^3/с (почти половина расхода воды в самом рукаве на тот момент) (рисунок 3). Общий объем воды, поступившей в дельту в результате прорыва дамбы, составил 0,131 км^3, а площадь затопления – 125 км^2. Речные воды сначала затопили северную часть дельты, ограниченную М. Роной и заброшенным рук. Альбарон, потом распространились в южную часть, достигнув лагуны Ваккарес и прилегающих к ней лагун. Значительная часть этих вод была откачана непосредственно обратно в Рону, остальная отведена в лагуну Ваккарес.

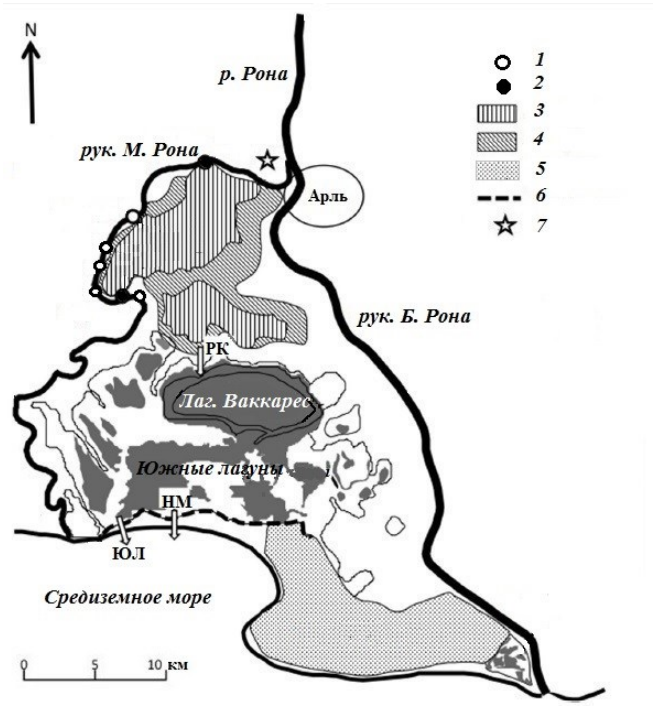


Рисунок 3. Карта-схема районов затопления Северного Камарга в дельте Роны 1993 и 1994 гг. на основе [Pont, Day, Ibáñez, 2017]. Места прорыва дамб: *1* – в октябре 1993 г., *2* – в январе 1994 г.; зоны затопления: *3* – в октябре 1993 г., *4* – в январе 1994 г.; *5* – пруды для выпаривания соли, *6* – вдольбереговая дамба Диг-а-ля-Мер, *7* – г/п; РК – направление потока по каналу Русти из Северного Камарга в Ваккарес, ЮЛ – соединение Южных лагун с морем, НМ – откачка воды в море на насосной станции

Figure 3. Schematic map of the flooded areas of the Northern Camargue in the Rhone delta in 1993 and 1994 at [Pont, Day, Ibáñez, 2017]. Locations of levees breaks: 1 – October 1993, 2 – January 1994; flood zones: 3 – October 1993, 4 – January 1994; 5 – salt evaporation ponds, 6 – alongshore dam Digue-à-la-Mer, 7 – gauge station; РК – direction of flow along the Canal Rousty from Northern Camargue to the Vaccares lagoon, ЮЛ – connection of the Southern lagoons with the sea, NM – pumping water into the sea at a pumping station

Стоковое наводнение в дельте Роны в январе 1994 г. (или океанического типа согласно [Boudet, Sabatier, Radakokovitch, 2017]) развивалось аналогичным образом, начавшись с постепенного увеличения расходов воды в верховье Роны, притоков Соны и Изера. Сильные грозы на юге, прошедшие 6 января 1994 г., вызвали рост расходов воды в Ардеше и Дюрансе. Стремительный рост расходов воды Роны в ВД (с 4464 м^3/с 6 января до 10572 м^3/с 8 января) способствовали развитию наводнения в дельте до середины января (общая продолжительность восемь дней). Наводнение также вызвало прорывы дамбы на М. Роне (причем на том же

участке, что и в наводнение 1993 г.). Картина затопления дельты была также схожа с событием 1993 г.

Стоково-нагонное наводнение в дельте Роны в декабре 2003 г. (или средиземноморского типа по [Boudet, Sabatier, Radakokovitch, 2017]), было вызвано исключительными гидрометеорологическими условиями – относительно высокими для зимы температурами воздуха, большим количеством осадков, насыщенностью влагой почв, сильным юго-восточным ветром с моря (скоростью свыше 16 м/с), вызвавшим штормовой нагон и сильное волнение (высота и период волн ~5 м и 5 с соответственно) [Arnaud-Fassetta, 2003; Maillet et al., 2006]. Наводнение затронуло 24 департамента на юго-востоке Франции (долина Роны ниже по течению г. Лион). С 30 ноября по 2 декабря на водосборе Роны выпало ~500 мм осадков (393 мм в Севеннах и 100 мм в долине Роны), что привело к росту расходов воды реки и ее притоков. Максимальный пиковый расход Роны в ВД составил 11500 (±5 %) $м^3/с$ (3 декабря 2003 г.; 21:00), что соответствовало, согласно [Arnaud-Fassetta, 2003; Maillet et al., 2006], наводнению, происходящему один раз в 100 лет. Рона в низовье и дельте вышла из берегов, затопила аллювиальную равнину площадью $429,1 \pm 21,5$ км^2 и разрушила несколько дамб обвалования. Наиболее пострадали районы между Бокером – Тарасконом и Арлем (объем воды, прошедший через три туннеля, пересекающих дамбы обвалования, составил 16–18 млн м^3), а также на правом берегу рук. М. Рона, где произошел прорыв двух крупных защитных дамб в районе фермерских хозяйств «Petit Argence» и «Claire Farine». Наводнение способствовало отложению $810,43 \pm 40,52$ тыс. м^3 наносов на поверхности дельты. При этом вдоль МКД Роны по обе стороны от г. Сент-Мари-де-ла-Мер из-за сильного шторма, совпавшего с наводнением, было потеряно до $544,33 \pm 27,22$ м^3 песка [Arnaud-Fassetta, 2003]. Согласно [Maillet et al., 2006], рук. Б. Рона за время этого наводнения в море было вынесено до 7,81 млн м^3 наносов, а устье самого рукава углубилось (поскольку темпы эрозии русла превышают темпы накопления наносов). Ущерб от декабрьского наводнения 2003 г. был довольно серьезным, особенно на участке Роны ниже по течению Авиньона и в дельте. В зоне затопления оказались г. Арамон, несколько деревень и ферм. Были эвакуированы 2000 человек в Арамоне, почти 6000 человек, проживающих в северной части Арля, ~2600 жителей деревни Фурке и ~3000 человек, проживающих в районе Малый Камарг (западная часть дельты) после прорыва дамбы на М. Роне. В Арле потребовалось десять дней для откачки воды, чтобы осушить затопленные кварталы. Общая величина ущерба от наводнения была оценена Министерством экологии, устойчивого развития, транспорта и жилищного строительства Франции в 1,130 млрд евро (из них от 150 до 200 млн евро – в Арле) [Arnaud-Fassetta, 2003].

Стоково-дождевое наводнение в низовье и дельте Эбро в 1617 г. Согласно архивным источникам (книгам решений городских советов, планам общественных работ и другим рукописным материалам), представленным в [Thorndycraft et al., 2006], сильные дожди, прошедшие в Каталонии 2–6 ноября 1617 г., вызвали катастрофическое наводнение, которое нанесло серьезный ущерб всему региону. Было разрушено свыше 380 домов, 22 моста и 17 водяных мельниц, повреждены городские стены и ирригационные каналы. Расходы воды рек Тер, Сегре (приток р. Эбро) и Льобрегат превышали исторические максимумы за всю историю наблюдений. Стоково-дождевое наводнение в низовье Эбро привело к тому, что в г. Тортоса были разрушены городские стены, 152 здания, ирригационные каналы, две водяных мельницы, а в дельте Эбро образовалась обширная лагуна. Помимо прямого ущерба от наводнения (разрушение городской и сельской инфраструктуры) негативную роль сыграли косвенные последствия. Разрушение водяных мельниц привело к потере основного источника производства муки, что вызвало голод в крупных каталонских городах. Кроме того, паводковые воды образовали ряд медленно осыхающих прибрежных лагун, что привело к увеличению численности комаров и, соответственно, росту заболеваемости малярией среди прибрежного населения.

Стоково-дождевое наводнение в бассейне Эбро в октябре 1907 г. было вызвано проливными

дождями, затронувшими прибрежные и внутренние бассейны Каталонии, в том числе бассейн Эбро. Расход воды р. Сегре в районе г. Лерида достигал 4500 м^3/с (22 октября), а уровень воды превышал нормальный на 8–10 м [Barriendos, Rodrigo, 2006]. На самой Эбро вблизи дельты (г. Тортоса) пик одного из сильнейших наводнений, известных за период инструментальных наблюдений, пришелся на 23 октября. Максимальный мгновенный расход воды у Тортосы составил 23484 м^3/с. В районе Лериды и Тортосы были затоплены тысячи гектаров окружающих земель, частично разрушены защитные дамбы и жилые дома. При этом благодаря превентивным мерам и телеграфной связи между городами удалось избежать человеческих жертв и катастрофического ущерба.

Стоково-нагонное наводнение в дельте Эбро в январе 2020 г. было вызвано штормом «Глория», обрушившемся 19–24 января 2020 г. на северо-западную часть Средиземного моря, и затронувшим испанские провинции Каталония, Валенсия, Мурсия, Балеарские острова, и, в том числе, район дельты Эбро, который сопровождался сильными восточными ветрами (свыше 20 м/с) и очень высокими волнами (3,0–7,6 м). Катастрофическое наводнение в дельте Эбро, вызванное одновременно речными паводковыми и устремившимися вглубь дельты морскими водами, привело к затоплению рисовых полей в дельте (рисунок 4), размыву пляжей, частичному размыву песчаной косы Трабукадор, разрушению береговой инфраструктуры в прибрежных регионах и гибели 13 человек [Lorente et al., 2021; Rodríguez-Santalla, Navarro, 2021; Sanuy et al., 2020]. Ущерб от наводнения в дельте был оценен в 68,4 млн евро, а в целом по региону Каталония – в 545,2 млн евро.

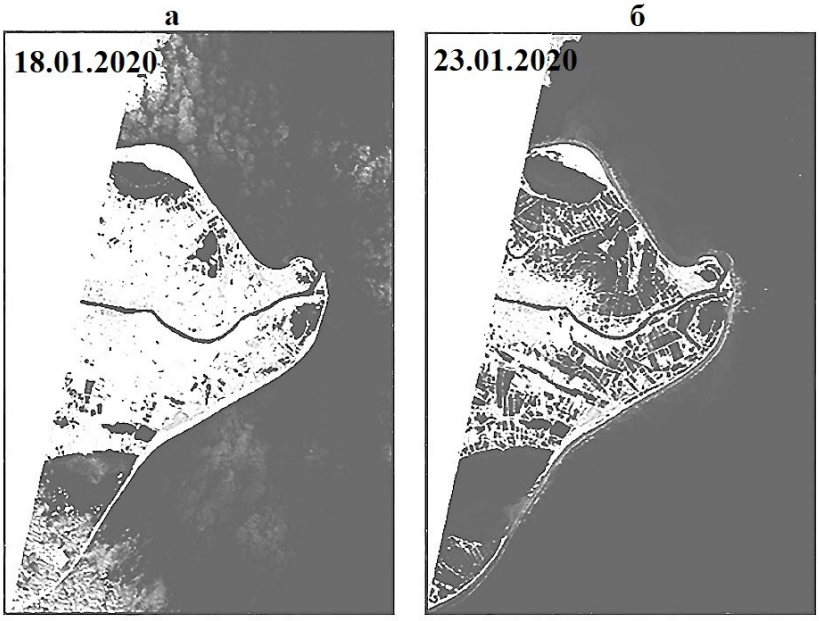


Рисунок 4. Карта затопления дельты Эбро во время наводнения в январе 2020 г.: состояние дельты перед (а) и после (б) прохождения шторма «Глория» по [Lorente et al., 2021]

Figure 4. Map of the Ebro Delta inundation during the flood in January 2020: state of the delta before (a) and after (b) the passage of Storm Gloria according to [Lorente et al., 2021]

Заключение

В обзоре зарубежной литературы, предпринятом авторами, рассмотрены подходы к типизации и понятийному определению опасных гидрологических процессов в устьевых областях рек Роны и Эбро.

ОГС в устье Роны различными учеными подразделяются как по генетическому признаку (т.е. по происхождению осадков, вызвавших наводнения: севенский, средиземноморский, океанический и смешанный), так и по величине расходов воды в дельте − от самых низких (маловодья) до самых высоких (экстремальные наводнения), а также в зависимости от

повторяемости и критического значения расхода воды реки на г/п Бокер.

Типизации ОГС в устье Эбро также основаны на определении интенсивности дождевых осадков (от проливных кратковременных конвективных до продолжительных обложных дождей) и оценке степени воздействия на окружающую среду и жизнь человека (на катастрофические, чрезвычайные крупные катастрофические, очень крупные катастрофические (охватывающие четыре и более речных бассейна).

Надо отметить, что ни во французской, ни в испанской научной литературе нет принятой типизации ОГС (в частности, наводнений) в устьях рек. Однако полученные результаты могут быть использованы в работах по дальнейшему изучению, идентификации, количественной оценке и ранжированию опасных гидрологических процессов, районированию подверженных их воздействию территорий и акваторий, а настоящая статья служить приглашением специалистов к дискуссии и дальнейшей разработке типизации и определений опасных гидрологических процессов в устьях рек.

Благодарности

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИВП РАН (тема № FMWZ-2022-0001; № государственной регистрации: 122041100222-7).

Acknowledgments

This study was carried out under Governmental Order to Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, subject no FMWZ-2022-0001.

Литература

Магрицкий Д.В. Опасные гидрологические явления и процессы в устьях рек: вопросы терминологии и классификации // Наука. Техника. Технология (политехнический вестник). 2016. № 2. С. 35–61.

Михайлов В.Н., Горин С.Л. Новые определения, районирование и типизация устьевых областей рек и их частей – эстуариев // Водные ресурсы. 2012. Т. 39. № 3. С. 243−257.

Михайлов В.Н., Михайлова М.В., Магрицкий Д.В. Основы гидрологии устьев рек. М.: Триумф, 2018. 313 с.

Михайлова М.В. Переформирование дельты р. Эбро под влиянием значительного антропогенного сокращения стока наносов // Водные ресурсы. 2003. Т. 30. № 4. С. 409−417.

Михайлова М.В., Исупова М.В. Гидрологический режим дельты р. Роны и динамика ее морского края // Водные ресурсы. 2006. Т. 33. № 6. С. 643−654.

Arnaud-Fassetta G. Dyke Breaching and Crevasse-Splay Sedimentary Sequences of the Rhône Delta, France, Caused by Extreme River-Flood of December 2003 // Geogr. Fis. Dinam. Quat. 2013. № 36. P. 7–26. DOI: 10.4461/GFDQ.2013.36.1.

Arnaud-Fassetta G. River channel changes in the Rhone Delta (France) since the end of the Little Ice Age: geomorphological adjustment to hydroclimatic

References

Magritsky D.V. Opasnye hydrologicheskiye yavleniya y protsessy v ust’yah rek: voprosy terminologuii y classifikatsii [Dangerous hydrological phenomena and processes at river mouths: terminology and classification issues]. *Nauka. Tekhnika. Tekhnologiya (polytekhnicheskiy vestnik) [Science. Technics. Technology (Polytechnic Bulletin)]*, 2016, No. 2, pp. 35−61. (In Russian).

Mikhailov V.N., Gorin S.L. New Definitions, Regionalization, and Typification of River Mouth Areas and Estuaries as their parts. *Water Resources*, 2012, vol. 39, No. 3, pp. 247−260. DOI: 10.1134/S0097807812030050.

Mikhailov V.N., Mikhailova M.V., Magritsky D.V. Osnovy hydrologii ust'ev rek [Fundamentals of river mouth hydrology]. Moscow: *Triumf*, 2018, 313 p. (In Russian).

Mikhailova M.V. Transformation of the Ebro River Delta under the Impact of Intense Human-Induced Reduction of Sediment Runoff. *Water Resources*, 2003, vol. 30, No. 4, pp. 370−378. DOI: 10.1023/A:1024963911893.

Mikhailova M.V., Isupova M.V. Hydrological Regime of the Rhône Delta and Dynamics of its Coastline. *Water Resources*, 2006, vol. 33, No. 6, pp. 595−607. DOI: 10.1134/S0097807806060017.

Arnaud-Fassetta G. Dyke Breaching and Crevasse-Splay Sedimentary Sequences of the Rhône Delta, France, Caused by Extreme River-Flood of December

change and natural resource management // Catena. 2003. № 51. P. 141–172.

Arnaud-Fassetta G., Quisserne D., Antonelli C. Downstream grain-size distribution of surficial bed material and its hydro-geomorphological significance in a large and regulated river: the Rhône River in its delta area (France) // Géomorphologie: relief, processus, environnement. 2003. V. 9. № 1. P. 33−50. DOI: 10.3406/morfo.2003.1164.

Barriendos M., Rodrigo F.S. Study of historical flood events on Spanish rivers using documentary data // Hydrological Sciences Journal. 2006. № 51 (5). Special issue: Historical Hydrology. P. 765–783.

Boudet L., Sabatier F., Radakovitch O. Modelling of sediment transport pattern in the mouth of the Rhone delta: Role of storm and flood events // Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2017. № 198. P. 568−582. DOI: 10.1016/j.ecss.2016.10.004.

IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2391 p. DOI 10.1017/ 9781009157896.

Isupova M.V., Mikhailova M.V., Dolgopolova E.N. Geographic-Hydrological Register of Deltas of Main World Rivers // Water Resources. 2022. V. 49. № 5. P. 927–940. DOI: 10.1134/S0097807822050062.

Llasat M.-C., Barriendos M., Barrera A., Rigo T. Floods in Catalonia (NE Spain) since the 14th century. Climatological and meteorological aspects from historical documentary sources and old instrumental records // J. of Hydrology. 2005. № 313. P. 32–47. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2005.02.004.

Lorente P., Lin-Ye J., García-León M., Reyes E., Fernandes M., Garcia Sotillo M., Espino M., Ruiz M.I., Gracia V., Perez S., Aznar R., Alonso-Martirena A., Álvarez-Fanjul E. On the Performance of High Frequency Radar in the Western Mediterranean during the Record-Breaking Storm Gloria // Frontiers in Marine Science. 2021. Vol. 8, Artc. 645762. DOI: 10.3389/fmars.2021.645762.

Maillet G.M, Vella C., Berné S., Friendd P.L., Amosd C.L., Fleurya T.J., Normandc A. Morphological changes and sedimentary processes induced by the December 2003 flood event at the present mouth of the Grand Rhône River (southern France) // Marine Geology. 2006. V. 234. Issues 1−4. P. 159−177. DOI: 10.1016/j.margeo.2006.09.025.

2003. *Geogr. Fis. Dinam. Quat.*, 2013, No. 36, pp. 7–26. DOI: 10.4461/GFDQ.2013.36.1.

Arnaud-Fassetta G. River channel changes in the Rhone Delta (France) since the end of the Little Ice Age: geomorphological adjustment to hydroclimatic change and natural resource management. *Catena*, 2003, No. 51, pp. 141–172.

Arnaud-Fassetta G., Quisserne D., Antonelli C. Downstream grain-size distribution of surficial bed material and its hydro-geomorphological significance in a large and regulated river: the Rhône River in its delta area (France). *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 2003, vol. 9, No. 1, pp. 33−50. DOI: 10.3406/morfo.2003.1164.

Barriendos M., Rodrigo F.S. Study of historical flood events on Spanish rivers using documentary data. *Hydrological Sciences Journal*, 2006, No. 51 (5). Special issue: Historical Hydrology, pp. 765–783.

Boudet L., Sabatier F., Radakovitch O. Modelling of sediment transport pattern in the mouth of the Rhone delta: Role of storm and flood events. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2017, No. 198, pp. 568−582. DOI: 10.1016/j.ecss.2016.10.004.

IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University Press*: UK, Cambridge, 2021.

Isupova M.V., Mikhailova M.V., Dolgopolova E.N. Geographic-Hydrological Register of Deltas of Main World Rivers. *Water Resources*, 2022, vol. 49, No. 5, pp. 927–940. DOI: 10.1134/S0097807822050062.

Llasat M.-C., Barriendos M., Barrera A., Rigo T. Floods in Catalonia (NE Spain) since the 14th century. Climatological and meteorological aspects from historical documentary sources and old instrumental records. *J. of Hydrology*, 2005, No. 313, pp. 32–47. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2005.02.004.

Lorente P., Lin-Ye J., García-León M., Reyes E., Fernandes M., Garcia Sotillo M., Espino M., Ruiz M.I., Gracia V., Perez S., Aznar R., Alonso-Martirena A., Álvarez-Fanjul E. On the Performance of High Frequency Radar in the Western Mediterranean during the Record-Breaking Storm Gloria. *Frontiers in Marine Science*, 2021, vol. 8, artc. 645762. DOI: 10.3389/fmars.2021.645762.

Maillet G.M, Vella C., Berné S., Friendd P.L., Amosd C.L., Fleurya T.J., Normandc A. Morphological changes and sedimentary processes induced by the

Pichard G., Arnaud-Fassetta G., Moron V., Roucaute E. Hydro-climatology of the Lower Rhône Valley: historical flood reconstruction (AD 1300–2000) based on documentary and instrumental sources // Hydrological Sciences Journal – Journal des Sciences Hydrologiques. 2017. V. 62. № 11. P. 1772–1795. DOI: 10.1080/02626667.2017.1349314.

Pont D., Day J.W., Ibáñez C. The impact of two large floods (1993–1994) on sediment deposition in the Rhône delta: Implications for sustainable management // Science of the Total Environment. 2017. № 609. P. 251–262. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.07.155.

Rodríguez-Santalla I., Navarro N. Main Threats in Mediterranean Coastal Wetlands. The Ebro Delta Case // J. of Marine Science and Engineering. 2021. № 9. Artc. 1190. DOI: 10.3390/jmse9111190.

Sanuy M., Rigo T., Jiménez J.A., Llasat M.C. Classifying compound coastal storm and heavy rainfall events in the north-western Spanish Mediterranean // Hydrology and Earth Systems Sciences. 2020. DOI: 10.5194/hess-2020-560.

Tena Á., Vericat D., Batalla R.J. Balance Sedimentario del Embalse de Ribarroja // Cuadernos de Investigación Geográfica // Geographical Research Letters. 2021. № 47 (2). P. 415−433. DOI: 10.18172/cig.4894.

Thorndycraft V.R., Barriendos M., Benito G., Rico M., Casas A. The catastrophic floods of AD 1617 in Catalonia (northeast Spain) and their climatic context // Hydrological Sciences–Journal–des Sciences Hydrologiques. 2006. № 51 (5). Special issue: Historical Hydrology. P. 899–912. DOI: 10.1623/hysj.51.5.899.

December 2003 flood event at the present mouth of the Grand Rhône River (southern France). *Marine Geology*, 2006, vol. 234, Issues 1−4, pp. 159−177. DOI: 10.1016/j.margeo.2006.09.025.

Pichard G., Arnaud-Fassetta G., Moron V., Roucaute E. Hydro-climatology of the Lower Rhône Valley: historical flood reconstruction (AD 1300–2000) based on documentary and instrumental sources. *Hydrological Sciences Journal – Journal des Sciences Hydrologiques*, 2017, vol. 62, No. 11, pp. 1772–1795. DOI: 10.1080/02626667.2017.1349314.

Pont D., Day J.W., Ibáñez C. The impact of two large floods (1993–1994) on sediment deposition in the Rhône delta: Implications for sustainable management. *Science of the Total Environment*, 2017, No. 609, pp. 251–262. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.07.155.

Rodríguez-Santalla I., Navarro N. Main Threats in Mediterranean Coastal Wetlands. The Ebro Delta Case. *J. of Marine Science and Engineering*, 2021, No. 9, artc. 1190. DOI: 10.3390/jmse9111190.

Sanuy M., Rigo T., Jiménez J.A., Llasat M.C. Classifying compound coastal storm and heavy rainfall events in the north-western Spanish Mediterranean. *Hydrology and Earth Systems Sciences*, 2020. DOI: 10.5194/hess-2020-560.

Tena Á., Vericat D., Batalla R.J. Balance Sedimentario del Embalse de Ribarroja. *Cuadernos de Investigación Geográfica*. *Geographical Research Letters*, 2021, No. 47 (2), p. 415−433. DOI: 10.18172/cig.4894.

Thorndycraft V.R., Barriendos M., Benito G., Rico M., Casas A. The catastrophic floods of AD 1617 in Catalonia (northeast Spain) and their climatic context. *Hydrological Sciences–Journal–des Sciences Hydrologiques*, 2006, No. 51 (5). Special issue: Historical Hydrology, pp. 899–912. DOI: 10.1623/hysj.51.5.899.

УДК 556.047 DOI: 10.34753/HS.2024.6.1.22

РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДОННОЙ ПЛОТИНЫ, ПОСТРОЕННОЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ МИНИМАЛЬНЫХ ЗИМНИХ УРОВНЕЙ НА РЕКЕ СУХОНЕ И ОЗЕРЕ КУБЕНСКОМ

А.В Белый
Вологодский государственный университет, г. Вологда, Россия
bely.epir@yandex.ru

Аннотация. Озеро Кубенское – одно из крупнейших озёр Вологодской области, издавна является объектом разнообразного хозяйственного использования, в том числе источником водоснабжения г. Вологды. Иногда его классифицируют как водохранилище сезонного регулирования, поскольку для нужд судоходства по реке Сухоне с 1827 года в 7 км от её истока возведен гидроузел с шлюзовой камерой и подпорной плотиной.

В 2011 году в 300 м выше створа шлюза «Знаменитый» построена глухая донная плотина согласно проекту «Повышение зимнего уровня Кубенского водохранилища для обеспечения работы Вологодского городского водозабора».

Это вызвано тем, что в зимнюю межень водозабор из озера должен служить гарантом бесперебойного водоснабжения г. Вологды. При формировании экстремально низкой зимней межени возникает чрезвычайная ситуация, поскольку из-за низких уровней в подводящем канале насосная станция прекращает свою работу. При этом критично ухудшаются условия зимовки промысловых рыб в озере Кубенском. В сущности, формируется опасное гидроэкологическое явление.

Получены результаты исследования минимальных зимних уровней на Верхней Сухоне и озере Кубенском, находящихся в подпорном режиме после строительства донной подпорной плотины. Выполнены полевые и камеральные работы, а также оценка минимальных зимних уровней расчетных

RESULTS OF EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF HYDROTECHNICAL FACILITIES BUILT TO INCREASE MINIMUM WINTER LEVELS ON THE SUKHONA RIVER AND LAKE KUBENSKOYE

Anatoly V. Bely
Vologda state University, Vologda, Russia,
bely.epir@yandex.ru

Abstract. Lake Kubenskoye is one of the largest lakes in the Vologda region, has long been an object of various economic uses, including a source of water supply for the city of Vologda. Sometimes it is classified as a reservoir of seasonal regulation, since for the needs of navigation on the Sukhona River, since 1827, a hydroelectric complex with a lock chamber and a retaining dam was built 7 km from its source.

In 2011, a blind bottom dam was built 300 m above the Znamenity lockin accordance with the project “Increasing the winter level of the Kubensky reservoir to ensure the operation of the Vologda city water intake”.

This is due to the fact that during the winter low-water period, water intake from the lake should serve as a guarantor of uninterrupted water supply to the city of Vologda. When an extremely low winter low water is formed, an emergency situation arises, because due to low levels in the supply channel, the pumping station stops its work. At the same time, wintering conditions for commercial fish in Lake Kubenskoye are critically deteriorating. In essence, a dangerous hydroecological phenomenon is being formed.

The results of a study of the minimum winter levels on the Upper Sukhona and Lake Kubenskoye, which are in the backwater regime after the construction of a bottom backwater dam, are obtained. Field and office work were carried out, as well as an assessment of the minimum winter levels of design probabilities. The insufficiency of the regulating effect of the bottom dam and the

Bely A. V. Results of evaluation of the efficiency of hydrotechnical facilities built to increase minimum winter levels on the Sukhona river and lake Kubenskoye. *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2024, vol. 6, iss. 1, pp. 22–34. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2024.6.1.22.

обеспеченностей. Показана недостаточность регулирующего эффекта донной плотины и сохранение указанного опасного гидроэкологического явления.

Ключевые слова: река; озеро; уровни воды; водозабор; плотина; зимняя межень; опасное явление; расчетные гидрологические характеристики.

preservation of the indicated dangerous hydroecological phenomenon are shown.

Keywords: river; lake; water levels; water intake; dam; winter low water; dangerous phenomenon; calculated hydrological characteristics.

Введение

Воднотранспортные пути в бассейне реки Сухоны за многие столетия развития подвергались значительным воздействиям – от русловых работ для улучшений условий местного судоходства до создания межбассейновых водных коммуникаций.

К такой коммуникации можно отнести Северо–Двинскую шлюзованную систему (СДШС), построенную в 1825–1828 гг.. Она соединяет бассейны двух морей – Каспийского и Белого в целом и бассейны рек Шексны и Сухоны в частности (рисунок 1).

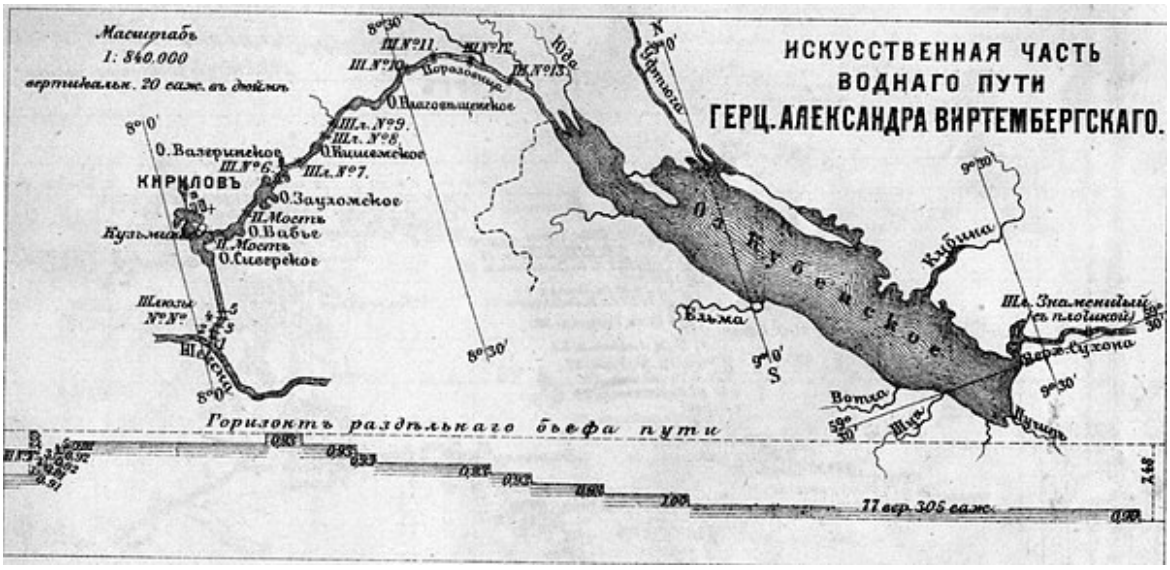


Рисунок 1. Ситуационный план и продольный профиль канала им. Герцога Александра Вюртембергского (Северо-Двинской шлюзованной системы) по состоянию на 1898 г. (https://regionavtica.ru/articles/severo-dvinskij_kanal.html)

Figure 1. The original plan of the channel them. Duke Alexander of Württemberg (North Dvina lock system) as of 1898. (https://regionavtica.ru/articles/severo-dvinskij_kanal.htm)

Водный путь с Волги на Северное море – давно известный на Севере. Водораздел между реками Славянка, притока Шексны и рекой Порозовица, впадающей в Кубенское озеро, называли Волок Славенский. Это название сохранилось в названии крупного села Волокославино, расположенного на высоком берегу реки Порозовицы.

Древний Волок Славенский предвосхитил современный Северо-Двинский водный путь, явился его предтечей. Созданная трасса СДШС на многих участках совпадает с участками древнего водно-волокового пути. В копаном русле пройдены только Топорненский и Кишемский каналы. СДШС в дальнейшем существенно повлияла на водный режим прилегающей территории.

Трасса СДШС берет начало от русла реки Шексна у поселка Топорня и далее проходит по Топорнинскому каналу, Сиверскому озеру, Кузьминскому каналу, реке Поздышка Зауломскому озеру, Вазеринским каналам №1

и №2, Кишемскомуозеру, Кишемскому каналу, реке Порозовице, Кубенскому озеру и по реке Сухоне до шлюза «Знаменитый» (рисунок 1). Общая протяженность трассы составляет около 130 км.

Таким образом, при выборе трассы канала рационально использованы местные гидрографические объекты и рельеф.

Достаточно интересным участком на трассе СДШС является южная акватория Кубенского озера и река Верхняя Сухона – от истока до деревни Шера (рисунок 2).

Здесь в южной части акватории Кубенского озера, в 7,5 км ниже истока реки Сухоны, трассу СДШС замыкает шлюз «Знаменитый» (гидроузел №7) (рисунок 3).

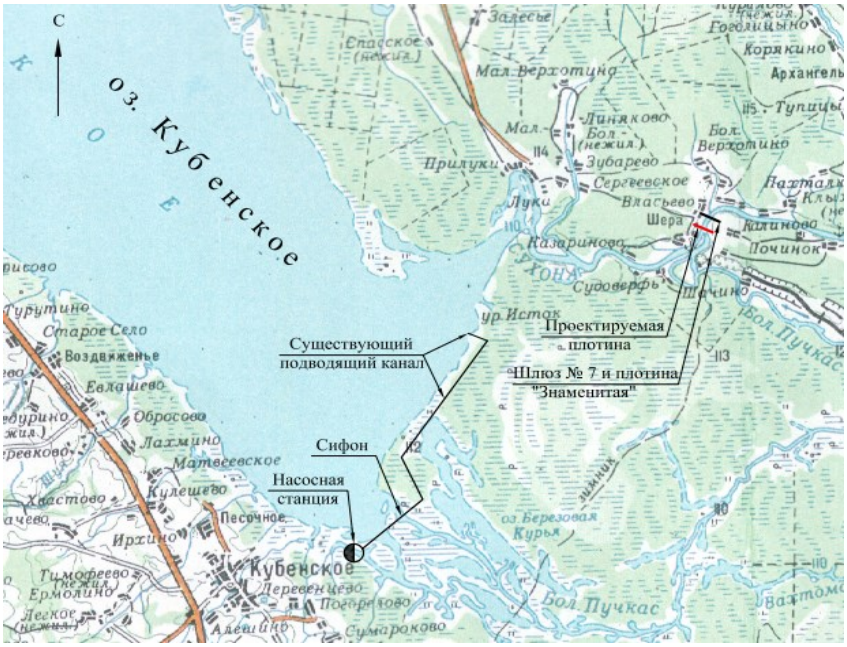


Рисунок 2. Исследуемый район и схема расположения гидротехнических сооружений [1]
Figure 2. Study area and location of water level observation points[1]



Рисунок 3. Комплекс гидротехнических сооружений Шлюза «Знаменитый» (https://www.google.ru/maps/place/4/5/60)
Figure 3. Complex of hydraulic structures of the Znamenity lock (https://www.google.ru/maps/place/4/5/60)

[1] Географический атлас мира. М.: Ультра Экстент, Арбалет, 2008. 248 с.

Isupova M. V., Mikhailova M. V. Peculiarities of typication of dangerous hydrological events at river mouths, the Rhone and Ebro as examples. *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2024, vol. 6, iss. 1, pp. 8–22. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2024.6.1.8.

Гидрографическим условиям и водному режиму озера Кубенского и реки Сухона посвящена достаточная литература [Ильинский, 1928; Филенко, 1966; Ресурсы поверхностных вод, 1972; Кириллова, 1974; Ильина, Грахов, 1987]. Структурными элементами гидроузла являются судоходный шлюз и подпорная плотина типа «ПОАРЭ». Плотина поддерживает судоходные уровни на озере Кубенском и на Верхней Сухоне в навигационный период (рисунки 3 и 5). Озеро Кубенское вследствие создания этого подпорного сооружения относят к водохранилищу сезонного регулирования.



Рисунок 4. Подпорная плотина ПОАРЭ шлюза Знаменитый СДШС. Вид с нижнего бьефа (фото автора)

Figure 4. Poiret retaining dam of the Znamenity lock of the SDSS as of 20.08.2020. View from the downstream (author's photo)

Основным лимитирующим фактором судоходства выше плотины является перекат на реке Сухоне в створе заходных буев (вблизи створа – д. Прилуки) с отметкой дна 106,3 мБС. Критическая минимальная отметка водной поверхности для судоходства составляет в этом створе, по данным Вологодского района водных путей, 107,4 мБС (рисунок 5).

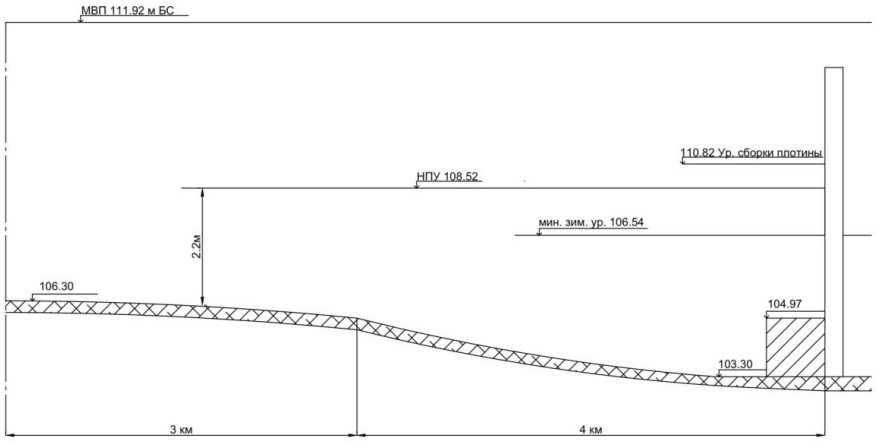


Рисунок 5. Схема характерных уровней, определяющих судоходный режим на Шлюзе «Знаменитом» по данным Вологодского района водных путей[2]

Figure 5. Scheme of characteristic levels that determine the navigational regime at the Znamenity lock according to the data of the Vologda region of waterways[2]

[2] Мероприятия по сохранению и восстановлению качества водных ресурсов бассейна Кубенского озера: Отчёт о НИР/отв. исп. А.В. Белый. Вологда: Вологдаинжпроект,1993 167с.

В 2011 г. в створе, расположенном в 300 м выше существующей подпорной плотины «ПОАРЭ» построена дополнительная регулирующая донная плотина (рисунок 10). Задачей ее является удержание минимальных зимних уровней в верхнем бьефе гидроузла №7 и южной акватории озера Кубенского на отметках, гарантирующих бесперебойный водозабор для города Вологды.

В этой связи предметом настоящего исследования является сравнительная оценка влияния гидротехнических сооружений (ГТС) из состава гидроузла №7 и донной плотины на расчетные минимальные зимние уровни в верхнем бьефе. В рамках исследования поставлены и решены следующие задачи:

- выполнить сбор и анализ информации по зимнему уровенному режиму реки Сухоны и озера Кубенского во всех имеющихся источниках;
- установить основные характеристики всех объектов водохозяйственного комплекса рассматриваемой территории;
- получитьоценки основных показателей уровенного режима реки Сухоны и озера Кубенского в период зимней межени до строительства донной плотины;
- выполнитьсравнительный анализ изменений минимальных зимних уровней воды в расчетных створах, вызванных строительством донной регулирующей плотины.

Постановка вопроса и состояние проблемы

В семидесятые годы XX века на исследуемой территории создан комплекс гидротехнических сооружений для забора воды в город Вологду – насосная станция и водоподводящий канал (рисунки 2, 6 и 7). Это позволяет в лимитирующий период – низкую зимнюю межень иметь дополнительный источник водоснабжения для г. Вологды.

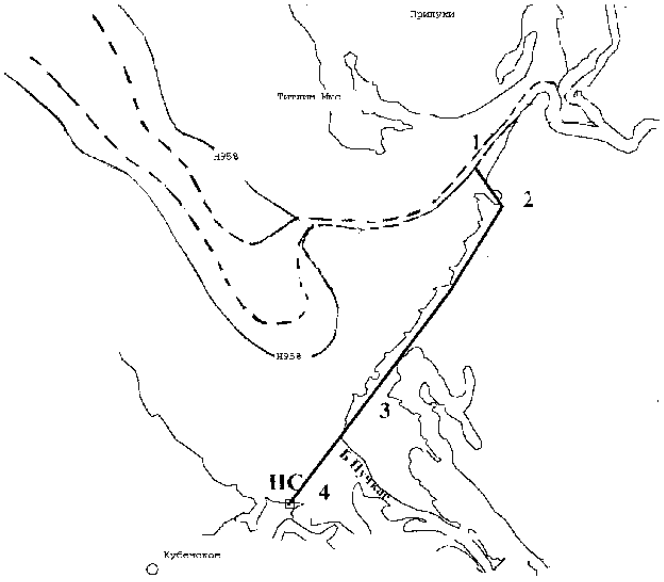


Рисунок 6. Схема водозаборных сооружений[2]:
1-2 –700-метровая часть подводящего канала, проложенная по дну озера; 4 (НС) – насосная станция
Figure 6. Scheme of water intake facilities[2]:
1-2 –700-meter part of the supply channel, laid along the bottom of the lake; 4 (NS)–pumping station]



Рисунок 7. Вид на р. Верхняя Сухона и оз. Кубенское на 13.04.21 г. На дальнем плане справа – водоподводящий канал насосной станции (фото автора)

Figure 7. View of the Upper Sukhonariver and Kubenskoelake on April 13, 2021. In the background on the right is the supply channel to the pumping station (author's photo)

В отдельные годы экстремально низкая зимняя межень на озере выступает опасным гидроэкологическим явлением, поскольку падение уровней в упомянутом подводящем канале нарушает бесперебойность работы насосной станции.

Подобная ситуация возникала зимой в 1992–1993 гг., 2000–2001 гг., 2002–2003 гг. Тогда реально происходили перебои водоподачи в город Вологду. По крайней мере, в двух указанных случаях – в 1992 и 2002 гг. – возникшей ситуации был присвоен ранг чрезвычайной. Можно выделить несколько причин порождающих указанную проблему. В частности:

1. Из 5400 м подводящего канала 700 м проходит по дну южной мелководной акватории озера. Этот участок постоянно замывается в теплый период года, поскольку глубины здесь невелики, волнение озера значительное, а дно сложено несвязными грунтами. К примеру, при аварийных дноуглубительных работах в зиму 1992–1993 г. топографы института «Вологдаинжпроект» установили факт замывания части подводящего канала, проходящей по дну озера Отметки дна канала возросли на 1,5 м: от 105,5 до 107,0мБС. *Это – первая причина.*

2. В работе [Ильина, Грахов, 1987] выполнена статистическая обработка данных многолетних гидрометрических измерений на опорных водомерных постах и установлены значения характерных и расчетных обеспеченных уровней в указанных гидрометрических створах (таблица 1).

На рисунке 6 пунктиром показана отметка изобаты озера при минимальном зимнем уровне 95 % обеспеченности. Возможно, что южная подледная часть озера в период низкой зимней межени представляет собой узкий водоток (как бы продолжение русла реки Кубены) с глубинами 0,6–0,8м, по которому осуществляется транзит стока из р. Кубены в р. Сухону [Ильина, Грахов, 1987]. Несомненно, что в маловодные периоды для поступления воды в водоподводящий канал между ним и подледным руслом реки Кубены должна быть обеспечена гидравлическая связь. *Эта связь, как установлено, при определенных условиях нарушается, что определяет вторую причину.*

3. На рисунке 8 представлена графическая интерпретация значений расчетных и наблюденных уровней. Расчеты топографических характеристик озера Кубенского позволили установить, что проектный уровень водозабора, принятый равным 107,2 мБС, оказался на 0,25 м выше уровня воды 9 5% обеспеченности в створе д. Прилуки (106,94 мБС) [Ильина, Грахов, 1987]. *Это третья причина перебоев водоподачи.* Исходя из приведенных утверждений, первоначально был предложен вариант возможного решения проблемы.

Таблица 1. Характерные и экстремальные уровни Кубенского озера и Верхней Сухоны [Ильина, Грахов, 1987]

Table 1. Characteristic and extreme levels of Lake Kubenskoye and Upper Sukhona [Ильина, Грахов, 1987]

Показатель, единица измерения	Наименование створа по озеру			
	Водпост Пески	Водпост Коробово	Водпост Прилуки	Водпост Знаменитый
Расстояние по судовому ходу, км	66,7	89,3	122,5	127,0
Период наблюдений	1936–1992 гг.	1931–1981 гг.	1985–1987 гг.	1876–1992 гг.
Уровень весеннего половодья (ВП) 1986 г.	112,05	111,99	111,86	111,60
Уровень ВП 1987 г.	111,55	111,45	111,20	111,05
Средний за ВП уровень 1986 г.	109,73	109,73	109,66	109,39
Минимальный зимний уровень 1986 г.	107,85	107,65	107,10	106,70
Уровень 16.01.92 г.		107,83	(107,42)	106,87
Уровень 15.02.92 г.		107,84	(107,14)	106,82
Минимальный зимний уровень, 95 % обеспеченность	107,65	107,55	106,94	106,50

Предложено, что безусловно необходимо искусственное повышение (регулирование) минимальных зимних уровней для обеспечения гарантированного водозабора для г. Вологды в экстремально низкие зимние межени, в том числе и для создания более благоприятных условий зимовки промысловых рыб [Ильина, Грахов, 1987].

Как вариант к рассмотрению предложено возвести глухую донную плотину в створе деревни Прилуки, что в 7.0 км выше гидроузла №7 (рисунок 9) [Кириллова, 1974]. По расчетам такая плотина не позволит опускаться минимальным зимним уровням ниже отметки 107,7 мБС

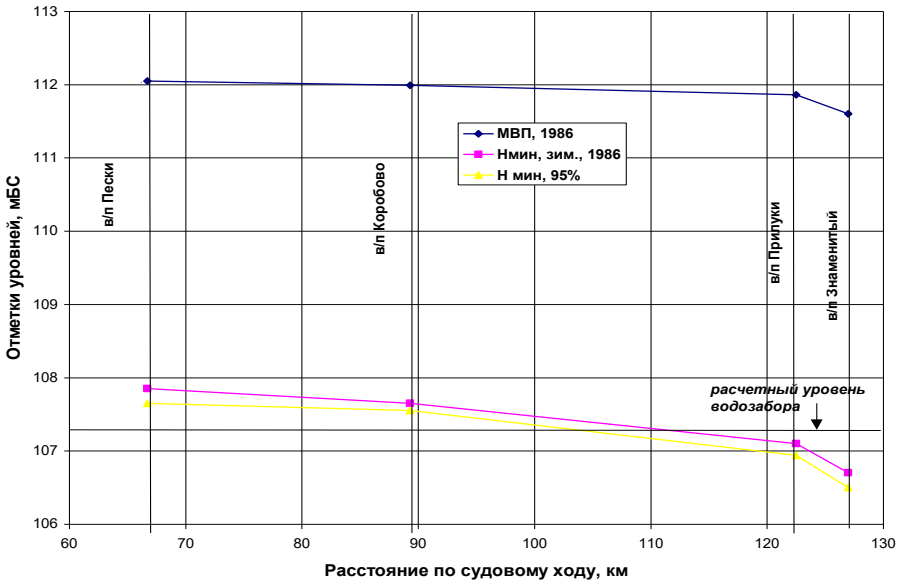


Рисунок 8. Продольный профиль озера Кубенского по судовому ходу для характерных и экстремальных уровней воды

Figure 8. Longitudinal profile of Lake Kubenskoye along the ship's course for characteristic and extreme water levels

В 2005 г. проектным институтом «Ленгипроречтранс» разработан рабочий проект строительства: «Повышение зимнего уровня Кубенского водохранилища для обеспечения работы Вологодского городского водозабора» со следующими инженерно-техническими решениями.

1.Устройство водосливной плотины предусмотрено в 300 м выше по течению от плотины шлюза «Знаменитый»;

2.Расчетный проектный уровень 97 % обеспеченности на створ водозабора должен составлять 107,70 мБС;

3.Приняты следующие технические проектные характеристики – длина плотины по водосливу 166,5 м, ширина гребня –3,0 м, отметка гребня – 107,5 мБС;

4. Предусмотрено устройство противофильтрационной завесы из сварных шпунтовых панелей с проектной отметкой верха 107,0 мБС;

5. Высотная отметка гребня донной плотины принята равной 107,5 мБС и должна обеспечить проектный уровень в верхнем бьефе плотины 107,64 мБС, а в створе водозабора – 107,70 мБС [Кириллова, 1974].

Результаты исследования

Указанный проект регулирующей донной плотины был реализован строительством в 2011 г. (рисунок 10). Плотина построена на участке, где судоходство практически отсутствует и не является ограничивающим фактором.

В августе 2020 г., апреле 2021 г. и в марте 2022 и 2024 гг. года автором были выполнены обследования объекта строительства. Получена информация о плановом и высотном положении основных структурных элементов, а также ряды минимальных зимних уровней после строительства (рисунки 7 и 10).



Рисунок 9. Схема предложенных инженерных решений[3]
Figure 9. Scheme of the proposed engineering solutions[3]

В частности, с помощью ГНС-приемника (метод RTK) установлены отметки уровней воды по состоянию на 16.04.2021 г., в том числе в створе д. Прилуки, где регулярные гидрометрические наблюдения в настоящее время не ведутся (таблица 2, колонка 7). Перепад уровней между створом Шлюз «Знаменитый» и д. Прилуки составил 0,16 м, уклон в этом случае крайне мал – 0,00002.

В марте 2024 г. выполнено уточнение отметок гребня донной плотины и верха шпунтовой стенки. Нивелирование выполнялось электронным тахеометром SOCCIA CX-106 от контрольного репера водомерного поста Шлюз

[3]«Повышение зимнего уровня Кубенского водохранилища для обеспечения работы Вологодского городского водозабора» Рабочий проект, пояснительная записка / ЗАО «Проектно- изыскательский институт Ленгипроречтранс» // Санкт Петербург, 2005 г.

«Знаменитый» (113,963 мБС). Установлено, что высота гребня плотины составляет 107,197 мБС (проект 107,50 мБС), шпунтовой завесы – 107,142 мБС (проект 107,00 мБС). Результаты вполне удовлетворительные.

С использованием оценочных значений уклона реки Сухоны, получены возможные расчетные уровни в створе проектного водозабора, практически совпадающего со створом д. Прилуки. Получено, что расчетный уровень (107,4 мБС) несколько ниже проектного уровня – 107,7 мБС (таблица 2).



Рисунок 10. Вид на донную плотину с БПЛА с правого берега Сухоны. На заднем плане комплекс гидротехнических сооружений шлюза Знаменитый. Март 2022 г. (фото автора)
Figure 10. UAV view of the bottom dam from the right bank of the Sukhona. In the background is the complex of hydraulic structures of the Znamenity lock in March 2022 (author's photo)

За постстроительный период эксплуатации донной плотины – (2012–2024 гг.) получены данные о зимних уровнях воды на водомерных постах – д. Коробово и Шлюз «Знаменитый». По данным этих постов выполнены расчеты обеспеченных характеристик минимальных срочных зимних уровней и уточнены такие же характеристики уровенного режима за период, предшествующий строительству донной плотины.

Обобщение статистических рядов значений минимальных уровней воды было выполнено с помощью кривых обеспеченностей. Обработаны ряды наблюденных уровней по водпостам Коробово и Шлюз «Знаменитый» за периоды 1991–2011 гг. и 2012–2024 гг. по каждому. Расчет теоретических квантилей кривых обеспеченностей выполнен методом наибольшего правдоподобия (МНП) для биномиального закона распределения вероятностей.

На рисунках 11 и 12, приведены эмпирические кривые обеспеченности и их теоретические аппроксимации для водомерных постов Коробово и Шлюз «Знаменитый».

а б

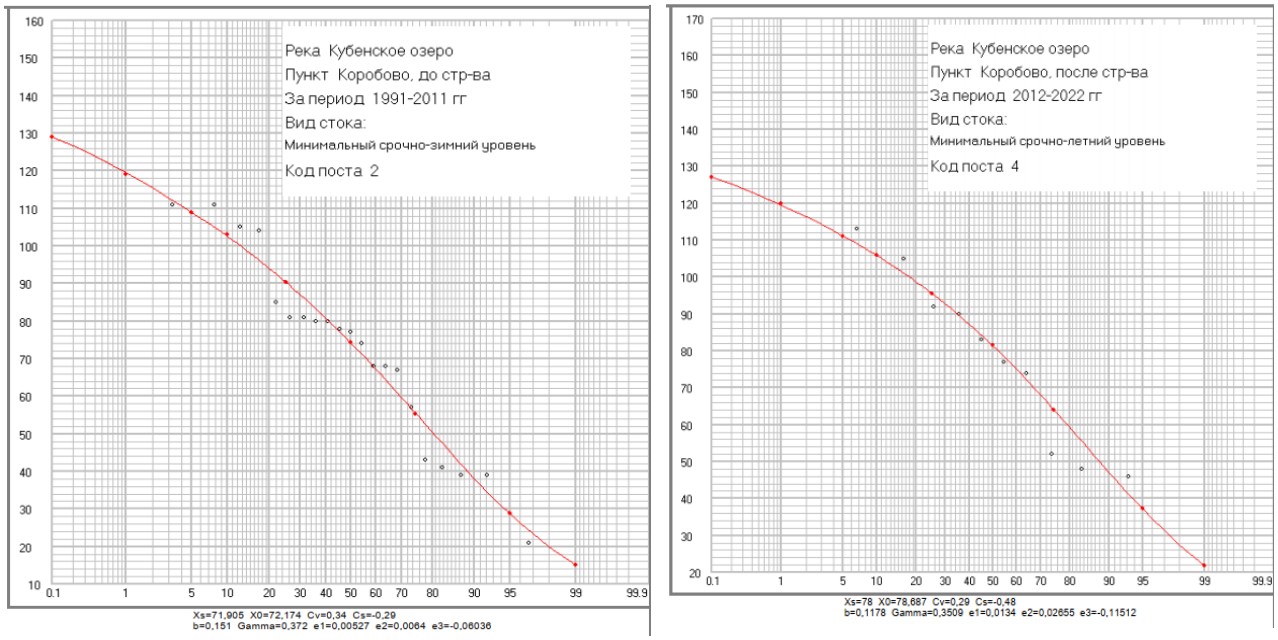


Рисунок 11. Эмпирические кривые обеспеченности минимальных зимних уровней по водпосту Коробово за период 1991–2011 гг.(а) и 2012–2022 гг. (б)

Figure 11. Empirical curve for the occurrence of minimum winter levels for the Korobovo water station for the period 1991–2011 (a) and 2012–2022 (b)

а б

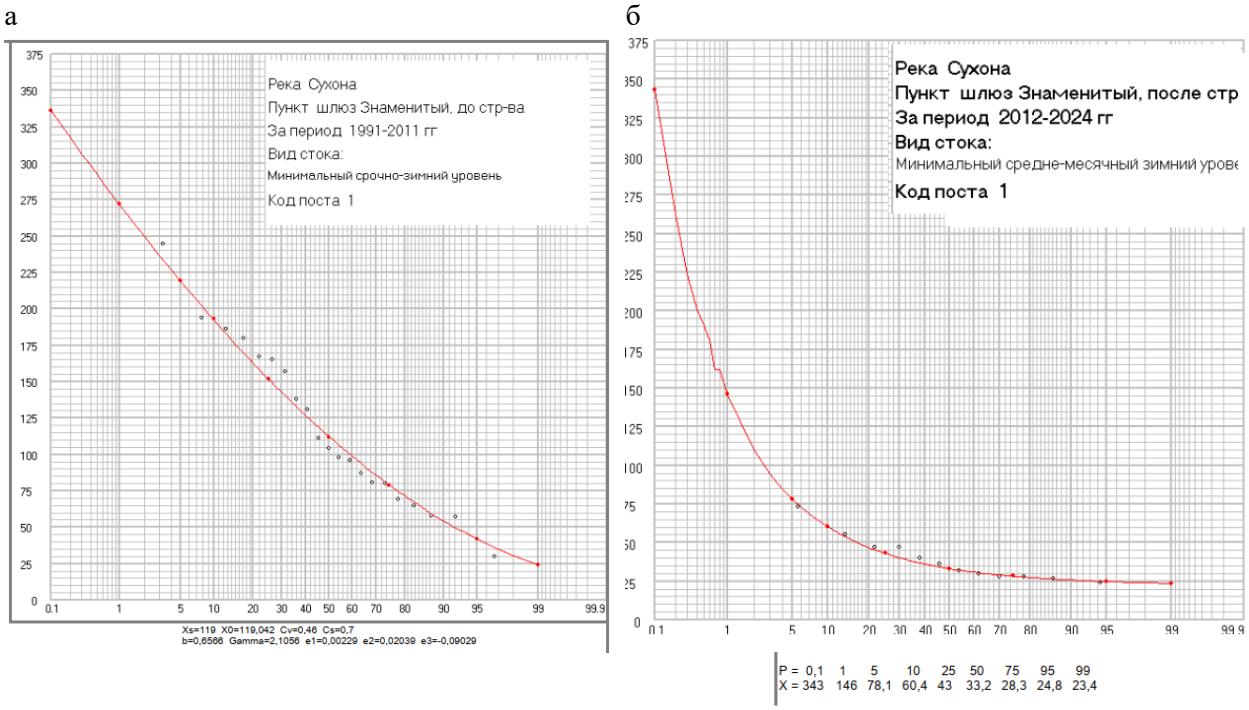


Рисунок 12. Эмпирические кривые обеспеченности минимальных зимних уровней по водпосту Шлюз «Знаменитый» за период 1991–2011 гг.(а) и 2012–2024 гг. (б)

Figure 12. Empirical curve for the provision of minimum winter levels at the Znamenity lock water post for the period 1991–2011 (a) and 2012–2024 (b)

Результаты статистического обобщения массивов данных представлены в таблице 2. Видно, что в створе плотины (водопост Шлюз «Знаменитый») произошел подъем уровней вероятностью превышения 50–99 %. Увеличение составило от 0,73–1,53 м.

Таблица 2. Минимальные зимние срочные уровни различной обеспеченности р. Верхней Сухоны и озера Кубенское

Table 2. Minimum winter urgent levels of various provision of the river. Upper Sukhona and Lake Kubenskoye

Водомерный пост	Статистистические характеристики ряда H_{min} за период до строительства плотины			Статистистические характеристики ряда H_{min} за период после строительства плотины			Оценка достоверности разности средних на 95 % уровне доверительной вероятности			
	X	V	S_x	X	V	S_x	d	S_d	$t_{эмп}$	$t_{теор}$
Шлюз «Знаменитый»	-31	0,46	3,11	41	0,63	7,77	72	8,37	8,6	2,1
Коробово	72, 2	0,34	5,48	78,7	0,29	7,21	6,53	9,06	0,72	2,1

Таблица 3. Результаты оценки статистической достоверности изменений уровней зимней межени на Верхней Сухоне и озере Кубенском

Table 3. Results of assessing the statistical significance of changes in the level regime of winter low water in the Upper Sukhona and Lake Kubenskoye

№ п/п	Обеспеченность, %	Обеспеченные минимальные зимние уровни, мБС			Изменение обеспеченных уровней, мБС		Фактические уровни в период полевых работ 16.03.2021 г.
		с начала наблюдений до 1991 г.	до строительства 1991–2011 гг.	после строительства 2012–2024 гг.	5–3	5–4	
Водомерный пост Шлюз «Знаменитый» верхний бьеф «0» графика 107,26 мБС							
1	50 %	106,80	106,64	107,37	0,57	0,73	
2	75 %	106,64	106,31	107,31	0,67	1,00	
3	95 %	106,50	105,90	107,27	0,77	1,37	
4	99 %		105,72	107,25		1,53	
5	Среднее (норма)		106,70	107,43		0,73	
6							107,59
Водомерный пост д. Коробово «0» графика 107,21 мБС							
1	50 %	107,76	107,95	108,02	+0,19	+0,07	
2	75 %	107,67	107,74	107,85	+0,18	+0,11	
3	95 %	107,55	107, 50	107,58	+0,03	+0,08	
4	99 %		107,36	107, 43		+0,07	
5	Среднее (норма)		107, 93	108,00		+0,07	
6							108,16
Гидрометрический створ д. Прилуки							
1	50 %			107,53			
2	75 %			107,47			
3	95 %			107,43			
4	99 %			107,41			
5	Среднее (норма)			107,59			
6	50 %						107,75

Выполнен анализ достоверности разности средних для расчетов по створам Коробово и Шлюз «Знаменитый» при 95 % уровне доверительной вероятности (таблица 3).

Проверка нулевой гипотезы (отсутствие существенности различий в значениях выборочных средних статистических рядов минимальных зимних уровней) выполнена с применением эмпирического критерия

Стьюдента *(t)*. В общем случае эмпирический критерий Стьюдента *t* для оценки существенности разницы *d* между средними двух выборок X_1 и X_2 есть отношение этой разности *d* к среднегеометрической ошибке расчета средних S_x:

$$t_{эмп} = \frac{d}{S_d} = \frac{X_1 - X_2}{\sqrt{(S_{x_1}^2 + S_{x_2}^2)}}, \qquad (1)$$

S_X – ошибка средней арифметической, определяемая по формуле $S_X = S/n^{0,5}$.

Стандартное отклонение рядов *S* получено с использованием коэффициента вариации *V* и нормы ряда *X* полученных при аппроксимации эмпирических кривых обеспеченностей методом наибольшего правдоподобия (МНП), по выражению: $S=X\times V$.

Согласно результатам расчетов, предоставленных в таблице 3, подъем средних минимальных уровней на водомерном посту Шлюз «Знаменитый» статистически достоверен на 95 % уровне значимости. Этот вывод, по-видимому, можно распространить и на значения квантилей большей обеспеченности.

В тоже время, согласно данным той же таблицы 3, изменения уровней на водомерном посту Коробово *статистически не значимы*, поскольку эмпирический критерий Стьюдента существенно ниже соответствующего теоретического значения.

Как отмечено выше, участок русла реки Сухоны от донной плотины до створа Прилуки в период минимальной зимней межени в сущности находится в подпоре, о чем свидетельствует крайне низкий уклон воды на этом участке – 0,00002. Тем не менее, величины этого подпора оказалось недостаточно, чтобы поднять уровни в створе водозабора и в южной части акватории Кубенского озера до проектных значений. Подпорное влияние донной плотины вероятно ограничивается створом Прилуки.

Выводы и рекомендации

1. Выполнены сбор и статистический анализ имеющейся информации по зимнему уровенному режиму реки Верхняя Сухоны и озера Кубенского.

2. Выполнены нивелирование и аэрофотосъмка элементов донной плотины в створе Шлюза «Знаменитый», а также нивелирование уровней воды на плотине и в истоке реки Сухоны в период зимней межени. Нивелирование отметок элементов донной плотины позволило установить, что высота гребня плотины составляет 107,197 мБС (проект 107,50 мБС), шпунтовой завесы – 107,142 мБС (проект 107,00 мБС). Результаты удовлетворительные.

3.Получены оценки статистических показателей уровенного режима реки Верхней Сухоны и озера Кубенского в период зимней межени. Расчеты выполнены по водомерным постам Шлюз «Знаменитый» и д. Коробово для рядов уровней воды за периоды до строительства плотины 1991–2011гг. и за послестроительный период 2012–2024 гг.

4. Выполнен сравнительный анализ изменений минимальных зимних уровней воды в расчетных створах, вызванных строительством донной регулирующей плотины. Установлено на 95 % уровне доверительной вероятности, что в верхнем бьефе донной плотины минимальные уровни выросли в среднем на 0,73 м. На озере Кубенском, в створе д. Коробово статистически значимого повышения минимальных зимних уровней не установлено.

5. На основе результатов представленного исследования можно выдвинуть предположение о недостаточности регулирующего действия построенной донной плотины на минимальные зимние уровни в районе упоминаемого водозабора из озера Кубенского.

Литература

Ильина Л.Л. Грахов А.Н. Реки Севера. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 128 с.

Кириллова В.А. Характеристика притока в озера // Кубенское озеро. Л.: Наука, 1974. С. 9–11.

References

Filenko R.A. *Vody Vologodskoy oblasti [Waters of the Vologda Oblast]*, publ. of Leningrad University, 1966, 132 p.

Озеро Кубенское. Часть 1. Гидрология. Л.: Наука, 1974. 308 с.

Ресурсы поверхностных вод, Т. 3. Северный край / Под. ред. И. М. Жила, Н. М. Алюшинской. Л.: Гидрометеоиздат, 1972. 664 с.

Филенко Р.А. Воды Вологодской области. Л.: Издательство Ленинградского университета, 1966. 132 с.

Ilyina L.L., Grakhov A.N. *Reki Severa [Rivers of the North]*, Leningrad, Gidrometeoizdat, 1987, 128 p.

Kirillova, V.A. *Kharakteristika pritoka v ozera [Characteristics of the inflow into the lakes].* In the book: Ozero Kubenskoye [Kubenskoye Lake], Leningrad, Science, 1974, pp. 9–11.

Ozero Kubenskoye Chast' 1. Gidrologiya. [Lake Kubenskoye. Part 1. Hydrology], Leningrad, Science, 1977, 308 p.

Resursy poverkhnostnykh vod, T. 3. Severnyy kray [Surface Water Resources, Volume 3, Northern Territory]. In Zhila I. M. and Alyushinskaya N. M. (ed.), Leningrad, Gidrometeoizdat, 1972, 664 p.

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

УДК 504.45:504.38: 628.1 DOI: 10.34753/HS.2024.6.1.35

УРБОКЛИМАТИЧЕСКИЕ ПРОЕКТЫ ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ В ВОДОСНАБЖЕНИИ МЕГАПОЛИСОВ

В.Н. Безносов[1], А.Л. Суздалева[2]
[1] ООО НПО «Гидротехпроект», г. Санкт-Петербург, Россия; [2] ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», г. Москва, Россия
SuzdalevaAL@yandex.ru

Аннотация. Недостаток воды для обеспечения водоснабжения мегаполисов и недопустимое снижение ее качества в распределительной водопроводной сети может иметь социальные и экономические последствия, которые позволяют рассматривать подобные явления как возникновение чрезвычайной ситуации. Основными причинами нарушения водоснабжения мегаполисов являются аномальные засухи и наводнения, сила и частота которых в период потепления климата постоянно возрастают. Для предотвращения событий такого рода необходима разработка и осуществление гидроклиматических проектов, позволяющих адаптировать водоснабжение мегаполисов к меняющимся условиям. Эту актуальную задачу можно решить только путем строительства трасс водноресурсной логистики, осуществляющих межрегиональное перераспределение водных ресурсов. Транспортировке подлежат паводковые воды, отвод которых позволяет избежать наводнений, наносящих значительный экономический и экологический ущерб. Для обозначения вод, которые могут быть перемещены в другой регион без ущерба для окружающей среды, предложен термин «мобильные водные ресурсы». Их объем должен определяться на основе результатов специальных

URBANIZATION CLIMATE ACTIONS TO PREVENT EMERGENCIES IN THE WATER SUPPLY OF MEGACITIES

Viktor N. Beznosov[1], Antonina L. Suzdaleva[2]
[1] Scientific and Industrial Research Association "Gidrotehproekt", St. Petersburg, Russian Federation; [2] National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russian Federation
SuzdalevaAL@yandex.ru

Abstract. Shortage of water for supply to megacities as well as unacceptable deterioration of its quality in the distribution water supply network may lead to social and economic implications that let one consider such phenomena as emergencies. The main causes of water supply disruption in megacities are abnormal droughts and floods which tend to show enhanced severity and frequency in the climate warming period. To prevent this, the development and implementation of hydroclimatic projects are required towards adapting the megacities' water supply system to the changing conditions. This pressing task can be solved only through the construction of water-resource logistic routes used to provide interregional redistribution of water resources. Floodwater which should be discharged to avoid floods that cause significant economic and environmental damage is to be exported. The term "mobile water resources" is proposed to denote water that can be moved to another region without environmental damage. The volume of water should be determined based on the results of a special hydrological investigation carried out taking into account the long-term dynamics of river runoff. To ensure the sustainable operation of water-resource logistic routes, it is necessary to arrange water depositories designed for the accumulation and storage of mobile water resources. This requires modernization of the existing storage

Безносов В.Н., Суздалева А.Л. Урбоклиматические проекты для предотвращения чрезвычайных ситуаций в водоснабжении мегаполисов // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2024. Т. 6. Вып. 1. С. 35–51. DOI: 10.34753/HS. 2024.6.1.35.

гидрологических исследований, проводимых с учетом многолетней динамики речного стока. Для обеспечения устойчивой работы трасс водноресурсной логистики необходимо создание водных депозитариев, предназначенных для накопления и хранения мобильных водных ресурсов. Это потребует модернизации режима существующих водохранилищ и создания новых искусственных водных объектов. Финансовые затраты на строительство трасс водноресурсной логистики не превысят ущерб, который могут нанести чрезвычайные ситуации, вызываемые нарушением водоснабжения мегаполисов. В настоящее время межрегиональное перераспределение вод осуществляется во многих странах. Некоторые из таких гидротехнических систем имеют трансграничный характер. На их основе формируется международный рынок водных ресурсов. Страны-экспортеры не только получают финансовую выгоду от продажи воды, но и укрепляют свое геополитическое положение. Если Российская Федерация, обладающая большим количеством мобильных водных ресурсов, создаст трассы водноресурсной логистики, она сможет стать одним из таких государств.

Ключевые слова: климатический проект; водный дефицит; водноресурсная логистика; мобильные водные ресурсы (МВР); экспорт воды; гигрогегемон.

pools and the creation of new artificial water bodies. The financial costs required for the construction of water-resource logistic routes will not exceed the damage that could result from emergencies due to water supply disruptions in megacities. At present, interregional water redistribution is practised in many countries. Some of such hydroengineering systems have a transborder character. They form a basis for the international water-resource market. Exporting countries not only benefit financially from selling water but also strengthen their geopolitical position. If the Russian Federation, which has extensive mobile water resources, creates water-resource logistic routes, it can become one of those states.

Keywords: climate action; water deficiency; water-resource logistics; mobile water resources (MWR); water export; hydrohegemon.

Введение

Водоснабжение крупных городов-мегаполисов, масштабы которых как в плане занимаемой площади, так и по плотности населения, неуклонно возрастают, является одним из наиболее уязвимых факторов, обеспечивающих необходимые условия для проживания в них людей [McDonald et al., 2016; He et al., 2021; Liu Y et al., 2024]. Весьма ощутимо это проявляется во время катастрофических природных явлений, например, землетрясений и ураганов [Balaei et al., 2020; Yu et al., 2024]. Последствия нарушения работы систем городского водоснабжения носят многоплановый и нередко катастрофический характер. Прекращение или резкое ограничение водоснабжения неизбежно вызывает нарушение работы систем водоотведения, в т.ч. бытовой канализации. Происходящее в результате этого накопление продуктов человеческой жизнедеятельности приводит к ухудшению санитарно-эпидемиологической обстановки. Кроме того, дефицит воды вызывает остановку работы различных предприятий, необходимых для жизнеобеспечения городского населения, прежде всего, производства пищевых продуктов. Неизбежным результатом этого становится резкое ухудшение условий жизни населения. Известны случаи, когда нарушение городского водоснабжения становилась причиной смерти

Beznosov V. N., Suzdaleva A. L. Urbanization climate actions to prevent emergencies in the water supply of megacities. *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2024, vol. 6, iss. 1, pp. 35–51. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2024.6.1.35.

людей [Santa-Cruz et al., 2024]. Таким образом, подобные события с полным основанием можно рассматривать как чрезвычайные ситуации.

В настоящее время нарушения работы систем городского водоснабжения все чаще обусловлены глобальными изменениями климата, которые сопровождаются аномальными флуктуациями гидрометеорологических условий [Biswas et al., 2023; Liu Z et al., 2024; Dias, Ghisi, 2024]. Причиной могут являться как продолжительные засухи, так и сильные наводнения [Li et al., 2022; Stallkamp et al., 2022; Quandt et al., 2022; Maskey et al., 2023].

Риск возникновения чрезвычайных ситуаций в водоснабжении мегаполисов будет возрастать при дальнейшем развитии наблюдающихся тенденций в изменении климата. Это обусловливает необходимость превентивной разработки и осуществления соответствующих урбоклиматических проектов [Безносов и др., 2024], которые могли бы предотвратить подобные катастрофы. Целью статьи является анализ перспективных направлений этой деятельности.

Методологические и правовые основы разработки урбоклиматических проектов

Климатические проекты (climate action) включают широкий спектр действий, целью которых является снижение неблагоприятного воздействия изменений климата на жизнедеятельность людей и окружающую среду. Во всех развитых странах, включая Российскую Федерацию, разработаны правовые акты, обеспечивающие государственную поддержку этой деятельности. Примером может служить национальный стандарт ГОСТ Р ИСО 14080-2021 «Управление парниковыми газами и связанные виды деятельности. Система подходов и методическое обеспечение реализации климатических проектов», содержание которого идентично международному стандарту ISO 14080:2018. При осуществлении климатических проектов используется два различных методологических подхода. Первый из них заключается в разработке мер по ограничению (корректировке) количества парниковых газов в атмосфере, выбросы которых сопровождают различные виды человеческой деятельности и, по мнению многих современных ученых, являются причиной наблюдающегося глобального потепления. Второй методологический подход основан на приспособлении (адаптации) населения к изменяющимся условиям. В соответствии с этим климатические проекты можно разделить на коррекционные и адаптационные [Суздалева, 2023]. Следует отметить, что определение термина «адаптационный проект» также содержится в действующих нормативно-правовых актах. Под ним подразумевается любой проект, соответствующий основным целям устойчивого развития Российской Федерации (ГОСТ Р 70339-2022 ««Зеленые» стандарты. Финансирование строительной деятельности в целях устойчивого развития. Рамочные основы и принципы», пункт 3.1). В качестве таковых, согласно Распоряжению Правительства от 14 июля 2021 г. №1912-р «Цели и основные направления устойчивого (в том числе «зеленого») развития Российской Федерации», признаются любые действия по снижению негативных последствий изменения климата.

Урбоклиматические проекты – это адаптационные проекты, целью которых является обеспечение безопасности жизнедеятельности городского населения в условиях изменяющегося климата и возникновения чрезвычайных ситуаций, обусловленных данным фактором. Их разработку в сфере водоснабжения следует рассматривать как важнейшее направление реализации, получившей широкое распространение в современном мире концепции «адаптивного города» (resilient city). Согласно данной концепции, современные города должны быть превращены в системы, способные без существенного ущерба переносить любые стрессовые внешние воздействия (главным образом различные природные бедствия) на основе заблаговременно созданных механизмов, позволяющих адаптироваться к критическому изменению условий [Wu et al., 2022; Huizenga et al., 2023].

Востребованность урбоклиматических проектов в сфере водоснабжения современных мегаполисов обусловлена тем, что наблюдающиеся глобальные изменения климата сопровождаются изменением водности речных бассейнов, на базе которых организованы

источники водоснабжения большинства этих городов. В одних регионах происходит снижение доступных запасов водных ресурсов в результате повторяющихся аномальных засух [AghaKouchak et al., 2022], приобретающих характер постоянных явлений, которые можно рассматривать как хронические чрезвычайные ситуации [Суздалева, Сидоренко, 2022]. В то же время в других регионах увеличивается частота катастрофических паводковых явлений, также приводящих к нарушению работы систем городского водоснабжения. Нередко возникает парадоксальная ситуация, когда при избыточном количестве воды в окружающей среде население испытывает острый дефицит воды, пригодной для питья и иных хозяйственно-бытовых целей. Кроме того, как засухи, так и наводнения обычно сопровождаются ухудшением санитарно-эпидемиологической обстановки [Эльпинер и др., 2007]. При подобном развитии событий они переходят из гидрометеорологических чрезвычайных ситуаций в категорию чрезвычайных ситуаций биолого-социального характера [Суздалева, 2022а].

Нехватка водных ресурсов, обусловленная глобальным потеплением, порождает кризисные явления не только в городах, но и в сельском хозяйстве, а также в сфере промышленного производства. Для решения данных проблем также должны разрабатываться климатические проекты [Суздалева, 2023]. Весьма актуальной задачей в этой области является принятие мер по недопущению утраты биоразнообразия в результате деградации природных экосистем, вызываемой изменением климатических условий. Высокая плотность населения мегаполисов и отсутствие у их жителей возможности самостоятельно обеспечить себя водой, необходимой для жизни, выдвигает проблему обеспечение их устойчивого водоснабжения на первый план.

Формы водного дефицита

Основной задачей при возникновении практически любой чрезвычайной ситуации в городском водоснабжении является ликвидация водного дефицита, т.е. преодоление ситуации, при которой население не может получить воду, пригодную для удовлетворения своих потребностей в необходимом для этого объеме.

Существует несколько форм водного дефицита [Суздалева, Горюнова, 2018], причины которых и способы предотвращения (ликвидации) принципиально различаются.

1. Физический дефицит воды обусловлен недостаточностью объема воды в источнике водоснабжения для обеспечения нормальных условий жизни населения и осуществления различных видов деятельности. В настоящее время это явление все более значимо проявляется на глобальном уровне и обозначается как «мировой кризис водопотребления». Его причина заключается в неуклонном росте народонаселения планеты при ограниченности доступных ресурсов пресной воды. В современных крупных городах физический дефицит усугубляется чрезвычайно высокой плотностью размещения людей. Именно этот фактор ограничивает развитие многих современных мегаполисов в условиях наблюдающихся изменений климата [McDonald et al., 2011]. Оптимальным решением проблемы является оперативное пополнение источника водоснабжения из водных объектов, расположенных в других регионах. Гидротехнические системы, осуществляющие необходимое для этого межбассейновое перераспределение вод, можно обозначить как трассы водноресурсной логистики [Суздалева, 2017]. Именно таким путем решается проблема развития мегаполиса Пекин-Тяньцзинь-Хэбэй (Beijing-Tianjin-Hebei – BTH) [Zhang et al., 2021]. Значительная часть его водоснабжения будет осуществляться за счет перемещения воды с юга страны. Существуют и иные способы решения проблемы, но все они имеют существенные недостатки. Например, строительство опреснителей может стать решением проблемы только в мегаполисах, расположенных на морских побережьях. Кроме того, показывает практика, что употребление такой воды негативно сказывается на здоровье людей [Nriagua et al., 2016]. В критических ситуациях можно доставлять бутилированную воду или подвозить ее в автоцистернах [Salehi, 2022]; в долгосрочной перспективе это не решает проблему водоснабжения больших масс населения.

Аналогичное заключение можно сделать как относительно проектов буксировки айсбергов из Антарктиды для получения пресной воды [Суздалева, Горюнова, 2018], так и ее конденсации из атмосферы [Szpak, Szczepanek, 2023].

2. Химический дефицит воды возникает при ухудшении ее качества до уровня, при котором употребление воды создает угрозу для здоровья человека. Подобные явления происходят, например, при залповых сбросах в источники водоснабжения вредных веществ. Загрязнение источников до недопустимого уровня нередко происходит и при наводнениях, сопровождающихся размывом хранилищ отходов или разгерметизацией резервуаров на промышленных предприятиях. Повышение загрязненности вод может наблюдаться и при засухе, когда при обычном уровне загрязнения объем «разбавляющих» вод снижается. Доставка населению воды, употребление которой может угрожать здоровью людей, крайне нежелательна. В Российской Федерации при возникновении подобной ситуации в соответствии со статьей 21 Федерального закона «О водоснабжении и водоотведении» от 07.12.2011 N416-ФЗ работа системы водоснабжения может быть временно прекращена. Но если загрязнение на водозаборе приобретает устойчивый характер, то подобные действия лишены смысла. Снизить уровень загрязненности этих водных объектов на современном этапе нереально. Поэтому люди многих крупных городов вынуждены употреблять воду, содержащую вещества, вредные для здоровья [Долгоносов, 2008; Сазонова, 2022]. Реальное решение проблемы в таких случаях возможно только на основе межрегионального перераспределения водных ресурсов.

3. Санитарно-эпидемиологический дефицит воды заключается в появлении в воде, поставляемой потребителю, опасных патогенов [Евтодиенко, Здольник, 2022], например, возбудителей холеры, гепатита, брюшного тифа и другие. Такие явления наблюдаются как при засухах, так и при наводнениях [Эльпинер и др., 2007]. Основными мерами по преодолению подобных чрезвычайных ситуаций являются дезинфекция вод, а также распространение среди населения информации о необходимости обеззараживания воды перед ее использованием. Решением проблемы и в данном случае может стать переход на забор воды из другого незараженного источника.

4. Инфраструктурный дефицит воды является следствием неразвитости системы водоснабжения, т.е. недостаточностью элементов инфраструктуры для удовлетворения на должном уровне потребностей всего населения. Так, в крупных городах некоторых развивающихся стран существуют районы, на которые система централизованного водоснабжения не распространяется [Maskey et al., 2023]. Их жители используют воду, самостоятельно отбирая ее из различных водных объектов, нередко сильно загрязненных, или из источников, состояние которых не контролируется. Во многих случаях инфраструктурный дефицит вызван недостатком средств для создания объектов, необходимых для доставки населению городов воды и ее очистки. Поэтому в публикациях данное явление обозначается еще и как экономический дефицит (economic scarcity) воды [Quandt et al., 2022]. Решение данной проблемы ограничивается не только недостатком финансовых средств. В ряде мегаполисов развитие системы городского водоснабжения за счет ее расширения на базе доступных водных ресурсов невозможно вследствие их ограниченности. Как и при других формах водного дефицита, удовлетворить нужды населения можно только путем создания трасс водноресурсной логистики.

5. Институциональный дефицит воды порождается несоответствием реалий в сфере городского водоснабжения правовым нормам и правилам, которые регламентируют деятельность организаций, обеспечивающих население водой. Данную форму водного дефицита порождают не только бюрократические преграды. Весьма значимым фактором являются устаревшие стереотипы мышления, не позволяющие осознать необходимость разработки новых подходов к водоснабжению крупных городов в условиях глобального изменения климата. До середины XX в. проекты межбассейнового перераспределения вод интенсивно разрабатывались в СССР [Березнер, 1985]. Но затем в сознании населения прочно укоренилось

мнение о том, что межбассейновое перераспределение вод принесет непоправимый вред окружающей среде. Этот стереотип мышления сформировался в 70-е гг. XX в. при отказе от переброски паводковых вод сибирских рек в Центральноазиатский регион. При обсуждении целесообразности реализации данного проекта следует напомнить, что предусматриваемое им межрегиональное перераспределение водных ресурсов не было предметом международной торговли. Все запланированные гидротехнические сооружения являлись государственной собственность и размещались в пределах СССР. В результате отказа от проекта современная Россия лишилась возможности получения значимого источника пополнения государственного бюджета и важнейшего инструмента геополитического влияния [Суздалева, 2020]. В массовом сознании это событие было воспринято как победа над советской бюрократией и приобрело ярко выраженную политическую окраску. Любые доводы о целесообразности возобновления данного проекта или осуществления каких-либо аналогичных действий до сих пор враждебно воспринимаются российским обществом. В других странах в сфере водоснабжения также существуют проблемы институционального характера [Quandt et al., 2022]. Но в большинстве из них население не воспринимает негативно проекты межрегионального перераспределения вод. Например, в США еще в конце XIX и начале XX вв., десятки крупных городов построили централизованные системы водоснабжения с подкачкой вод из отдаленных речных бассейнов [Turner et al., 2021]. Следует также вспомнить, что и в Российской Федерации существует системы межбассейнового перераспределения стока, и их функционирование не вызывает протестов общественности [Суздалева, 2022]. Через канал Иртыш-Караганда ежегодно перемещается 665–845 млн м^3. Часть этого объема используется для водоснабжения столицы Казахстана г. Астаны. Другая, действующая в современной России международная трасса водноресурсной логистики, – это водовод «Кигач-Актау». Объем поставляемых по нему в Казахстан вод из низовьев Волги с 2000 по 2010 гг. увеличился с 20 до 31,1 млн м^3. Это один из крупнейших в мире межгосударственных водоводов, протяженностью более 2 тыс. км. Существуют планы довести объем транспортируемых по нему вод до 95 млн м^3/год. Интересно отметить тот факт, что если во времена СССР западные специалисты поддерживали борьбу с проектом по переброске паводковых вод сибирских рек и высказывали опасения относительно его экологических последствий, то XXI в. исследования по модернизации этой трассы водноресурсной логистики финансировалось в рамках реализации программы Европейского союза «Оказание помощи Казахстану по переходу к модели «зеленой» экономики».

Формы водного дефицита нередко проявляются одновременно, обусловливая синергетически-резонансные эффекты. Истощение источников городского водоснабжения может происходить одновременно с ростом уровня их загрязненности. Вместе с тем различные формы водного дефицита развиваются и независимо друг от друга. По этой причине деятельность по предотвращению чрезвычайных ситуаций в водоснабжении мегаполисов должна предусматривать меры по предотвращению всех видов водного дефицита.

Чрезвычайные ситуации, обусловленные водным дефицитом, можно разделить на три категории (рисунок 1). Во-первых, это различные ***нарушения работы системы городского водоснабжения***, например, аварии на водоводах, а также на водозаборных и водоочистных сооружениях, которые приводят к прекращению подачи воды или к недопустимому снижению ее качества. Возникший таким образом водный дефицит носит кратковременный характер. Снизить риск подобных событий можно осуществлением мер по снижению вероятности возникновения водного дефицита инфраструктурного и институционального характера, т.е. повышая надежность элементов систем водоснабжения и совершенствуя управления ими. Ко второй категории относятся ***события, возникающие внезапно в результате залпового загрязнения источников водоснабжения***, например, при разрушении хранилищ токсичных отходов, захоронений патогенных материалов или резервуаров с

вредными веществами. Результатом становится возникновение физического, химического и санитарно-эпидемиологического водного дефицита. Это может произойти как в результате аварий на промышленных объектах, так и при различных природных катастрофах, в том числе спровоцированных потеплением климата (ураганов, селей и др.). Третья категория чрезвычайных ситуаций в системах водоснабжения мегаполисов связана с ***сокращением объема доступных водных ресурсов и ухудшением их качества до критического уровня***, при котором существующие водоочистные сооружения не могут выполнять свою задачу. Такие события развиваются либо в виде истощения источников водоснабжения, например, при возникновении хронической засухи, либо при возрастающем уровне загрязнения этих источников. Чрезвычайные ситуации третьей категории неизбежно приобретают затяжной характер. Учитывая численность населения мегаполисов, решить проблему водного дефицита подвозом воды автотранспортными средствами в этих условиях невозможно. Предотвратить масштабную социальную катастрофу или хотя бы смягчить ее последствия может только переход системы городского водоснабжения на другие источники водоснабжения. Создание условий для этого и является главной задачей урбоклиматических проектов.

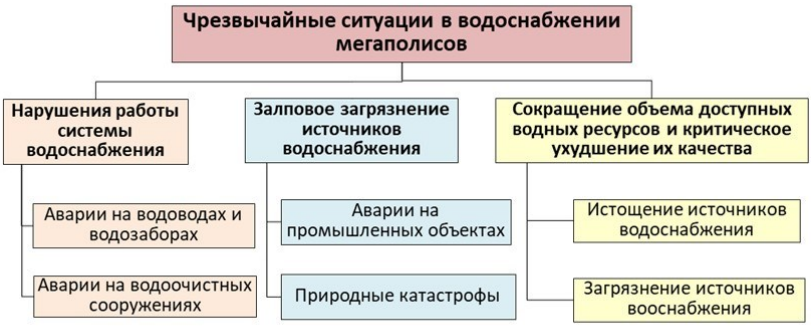


Рисунок 1. Чрезвычайные ситуации в водоснабжении мегаполисов и обусловливающие их события
Figure 1. Emergencies in the water supply of megacities and situations triggering them

Урбоклиматические проекты в сфере водоснабжения мегаполисов

Как показывает опыт последних десятилетий угроза социальных катастроф, обусловленных возникновением чрезвычайных ситуаций в системах городского водоснабжения, неуклонно возрастает во многих регионах. Это связано как с потеплением климата, так и с ростом мегаполисов и усложнением их структуры. Даже если запас устойчивости систем водоснабжения ранее оказался достаточен для преодоления кризисной ситуации, то это не является гарантией надежности их работы при разрушительном воздействии аномальных гидроклиматических флуктуаций большего масштаба, вероятность возникновения которых весьма высока. В Москве не допустить перебоев водоснабжения населения в период летней засухи 2010 г. удалось на пределе существующих возможностей. Уровень воды в подмосковных водохранилищах, являющих источником водоснабжения города, упал до критических значений. Обсуждался вопрос об их экстренном пополнении из других водотоков, например, из р. Оки. Подобные события могут возникнуть снова и сопровождаться негативными явлениями большего масштаба, которые превысят запас прочности системы водоснабжения московского мегаполиса. Решить данную проблему можно только на основе разработки и реализации урбоклиматического проекта, благодаря которому в нужный момент можно будет по трассе воднoресурсной логистики доставить объем вод, достаточный для преодоления водного дефицита. В других случаях необходимо создать системы отвода паводковых вод, которые периодически в одних и тех же районах нашей страны наносят ущерб, оцениваемый в миллиарды рублей [Суздалева,

2020]. Кроме того, существуют крупные города, источники водоснабжения которых подвержены риску залпового загрязнения, которое неизбежно вызовет химический водный дефицит. Водоснабжение г. Хабаровска, осуществляется из р. Амур, в приток которой – р. Сунгари, протекающую по территории Китая, – уже неоднократно происходили крупномасштабные аварийные сбросы вредных веществ. Меры, позволяющие избежать их попадание в систему водоснабжения г. Хабаровска, разрабатывались в авральном порядке. Например, планировалось создать временно отгороженные от реки участки акватории, из которых мог бы осуществляться водозабор в городскую систему в период прохождения по р. Амур «пятна загрязнения». Не вызывает сомнений, что безопасность жизнедеятельности населения г. Хабаровска, нельзя надежно обеспечить подобными мерами временного характера. Для решения данной проблемы также необходимо создание водноресурсной трассы, способной обеспечить подключение города к иным источникам водоснабжения.

На реализацию подобных урбоклиматических проектов требуется время, в течение которого в городах будет возникать острый водный дефицит, приводящий к многоплановой чрезвычайной ситуации (социальной, экономической, санитарно-эпидемиологической). Несложно представить негативные последствия, обусловленные недостатком воды, например, при прекращении работы канализации в любой многоэтажной городской застройке. Кроме того, авральное решение проблемы в долгосрочной перспективе само по себе может иметь весьма нежелательные последствия. Поставка воды из расположенных поблизости, но сильно загрязненных водных объектов создаст угрозу для здоровья жителей. По этой причине осуществление урбоклиматических проектов должно происходить заблаговременно. Их целью является не устранение последствий возникшей чрезвычайной ситуации, а обеспечение безопасных условий жизни, устойчивого развития современного общества и адаптации к глобальным климатическим изменениям.

Поскольку чрезвычайные ситуации в городском водоснабжении в одних регионах возникают в условиях засухи, а в других их причиной являются наводнения, то закономерно возникает идея о комплексном решении проблемы на основе межбассейнового перераспределения водных ресурсов, т.е. перемещения водных ресурсов из регионов, где возникает их избыток, в регионы, испытывающие их острый недостаток. В период потепления климата востребованность урбоклиматических проектов подобного рода резко возросла. Их основой является межбассейновое перераспределения речного стока, получающее в современном мире все большее распространение [Shumilova et al., 2018; Siddik et al., 2023; Zhou et al., 2024]. Благодаря ему уже обеспечивается водоснабжение более 10 % современных городов [McDonald et al., 2014].

Практическая реализация подобного методологического подхода в условиях глобальных климатических изменений требует решения комплекса задач, направленных на обеспечение водоснабжения мегаполисов. Основными являются три задачи.

1. Создание на основе уже существующих гидротехнических систем трасс водноресурсной логистики, способных перемещать на значительные расстояния большие объемы вод [Суздалева, 2015; 2017].

2. Разработка законодательно-правовой основы для реализации таких проектов, как для деятельности, обеспечивающей устойчивое развитие человеческой цивилизации [Федоров, Суздалева, 2014].

3. Включение систем водоснабжения мегаполисов в формирующуюся структуру международного рынка водных ресурсов [Суздалева, Горюнова, 2014], что позволит заблаговременно планировать финансовые расходы, необходимые для преодоления кризисных ситуаций, и находить экономически целесообразные варианты экспорта-импорта водных ресурсов.

При разработке урбоклиматических проектов, основанных на межрегиональном перераспределении водных ресурсов, необходимо руководствоваться принципом презумпции экологической опасности

намечаемой деятельности, сформулированным в статье 3 Федерального закона «Об охране окружающей среды». Его практическая реализация предполагает, как и при создании любых иных трасс воднoресурсной логистики, перемещение только паводковых вод – так называемых мобильных водных ресурсов (МВР), отвод которых не имеет негативных экологических последствий и вместе с тем снижает риск катастрофических наводнений [Суздалева, 2017]. Определение объема МВР в каждом конкретном случае должно устанавливаться на основе результатов специальных гидрологических исследований, проводимых с учетом многолетней динамики речного стока. Очевидно, что для обеспечения устойчивого водоснабжения необходимо создание водных депозитариев [Суздалева, 2022б], т.е. водохранилищ, в которых будет осуществляться накопление и хранение вод. Несомненно, во многих случаях такой водный депозитарий может быть создан только на значительном удалении от мегаполиса. Для доставки из него воды необходима прокладка водоводов или каналов, пересекающих различные естественные препятствия. Это один из доводов, выдвигаемых против целесообразности разработки подобных проектов. Однако не менее сложные условия возникали при проектировании нефте- и газопроводов, протяженность которых составляла сотни, а иногда и тысячи километров, и, несмотря на это, проекты успешно реализовывались. Обсуждая данный вопрос следует вспомнить о том, что без нефтепродуктов человек может существовать неограниченно долгое время, а без воды, как правило, не более суток. Экономический ущерб от затяжной чрезвычайной ситуации в системе водоснабжения мегаполиса и затраты на решение проблем, неизбежно порождаемых сопутствующей ему крупномасштабной катастрофой (эвакуацией огромного количества людей, обеспечением их жизнедеятельности и др.), будут сравнимы с финансовыми потерями от дестабилизации рынка нефтепродуктов. Кроме того, к настоящему времени уже накоплен значительный опыт решения разного рода проблем при прокладке трасс воднoресурсной логистики. Отклоненный проект перемещения в центрально-азиатский регион МВР из сибирских рек не только предполагал перемещение воды через десятки возвышенностей, но и включал строительство гидротехнических сооружений (дюкеров), позволяющих пересечь русла 194 водотоков, исключив смешивание их с транспортируемыми водами [Зиядуллаев и др., 1979]. Трубопроводы, обеспечивающие водоснабжения таких мегаполисов как Гонконг и Сингапур, проложены по дну моря [Суздалева, Горюнова, 2018]. Переговоры о прокладке аналогичных трасс воднoресурсной логистики, подводные участки которых имели бы протяженность более 100 км, проводились между Ираном и Кувейтом, а также Турцией и Израилем [Суздалева, 2022б].

Структура трасс воднoресурсной логистики

В наиболее простом варианте трасса воднoресурсной логистики, обеспечивающая дополнительное водоснабжение мегаполиса, должна включать нижеследующие элементы (рисунок 2).

1. Первичные депозитарии МВР, способные задерживать паводковые воды. Для этой цели целесообразно использовать существующие речные водохранилища, созданные на основе строительства подпорных гидротехнических сооружений, прежде всего, плотин ГЭС [Суздалева, 2015].

2. Промежуточные депозитарии МВР, в которые осуществляется отвод вод из речных водохранилищ, позволяющий избежать их переполнения и необходимость попусков. При разработке проекта переброски избыточной части стока сибирских рек для выполнения такой функции планировалось построить Тегизское водохранилище и использовать Туямуюнское водохранилище [Зиядуллаев и др., 1979]. Промежуточные депозитарии обеспечивают стабильность поставки необходимого мегаполису объема вод в период между паводками.

3. Транспортирующие гидротехнические сооружения или ***коммуникации*** (водоводы и каналы), соединяющие депозитарии с системой городского водоснабжения.

Для обеспечения работы трассы воднoресурсной логистики также необходимо создание ряда инфраструктурных объектов –

насосных станций, шлюзов и др. На некоторых зарубежных системах межрегионального перераспределения вод также создавались небольшие ГЭС, использующие энергию потока перемещаемых вод [Березнер, 1985].

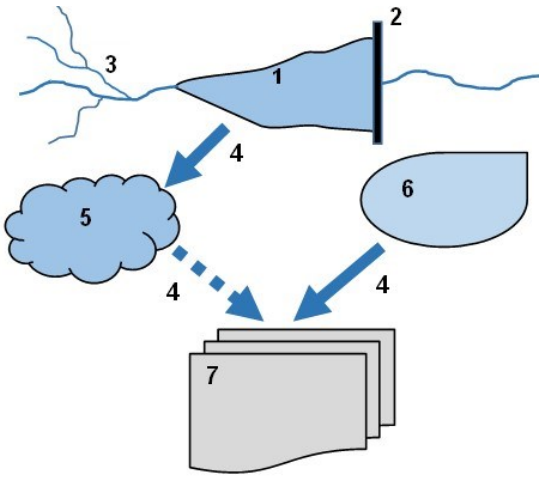


Рисунок 2. Схема водноресурсной логистической цепочки: 1 – первичный депозитарий МВР; 2 – подпорное гидротехническое сооружение; 3 – водосборный бассейн первичного депозитария; 4 – гидротехнические коммуникации; 5 – промежуточный депозитарий МВР; 6 – первоначальный источник городского водоснабжения; 7 – территория мегаполиса

Figure 2. Scheme of the water-resource logistic chain: 1 – primary MWR depository; 2 – retaining hydraulic structure; 3 – catchwater basin of a primary depository; 4 – hydraulic engineering communications; 5 – transitional depository of mobile water resources; 6 – primary source of urban water supply; 7 – megacity area

Подобный простейший вариант межрегионального водоснабжения, который можно обозначить как водноресурсная логистическая цепочка [Суздалева, 2017; Суздалева, Горюнова, 2018], в значительной степени зависит от гидрологического режима бассейна-донора МВР. Его маловодность на протяжении длительного периода может привести к истощению депозитариев. Поэтому риск возникновения чрезвычайных ситуаций в системах водоснабжения мегаполисов значительно снижается при создании сетей водноресурсной логистики, включающих две и более функционально связанные цепочки, подпитывающиеся из первичных депозитариев, созданных в различных речных бассейнах (рисунок 3). На современном этапе, для которого характерны не только аномальные гидроклиматические флуктуации, но и высокий уровень их межгодовой изменчивости и пространственной локализации, такие системы перераспределения водных ресурсов позволят обеспечить устойчивое водоснабжения одновременно нескольких мегаполисов вне зависимости от водности одного из речных бассейнов-доноров в тот или иной год.

Получение мегаполисами воды из других регионов не исключает использование первоначальных источников водоснабжения. Напротив, учитывая необходимость финансовых затрат для оплаты поставок воды по трассам водноресурсной логистики, во многих случаях депозитарии, созданные в различных речных бассейнах, будут использоваться лишь как дополнительные, покрывающие возникающий водный дефицит. По этой причине на рисунках 2 и 3 гидротехнические коммуникации между промежуточными депозитариями и системами городского водоснабжения обозначены пунктирными линиями.

Водноресурсные логистические сети, способные одновременно обеспечивать устойчивое водоснабжение нескольких мегаполисов, могут возникнуть только как результат длительного поэтапного усложнения их структуры и увеличения их масштабов. Для реализации такого пути развития необходимо использование методологии восходящего проектирования (bottom-up approach). Она

заключается в создании объектов, изначально предназначенных для последующего объединения в единую систему из функционально взаимодействующих элементов. В рассматриваемом случае это подразумевает учет при создании цепочек воднoресурсной логистики возможности их последующего включения в сети, обеспечивающие межрегиональное управления распределением водных ресурсов. Конечным результатом этой деятельности могут стать сети воднoресурсной логистики континентального уровня [Суздалева, Горюнова, 2018], способные противостоять угрозам в сфере водоснабжения мегаполисов в период глобально потепления, сопровождающегося аномальными гидроклиматическими флуктуациями.

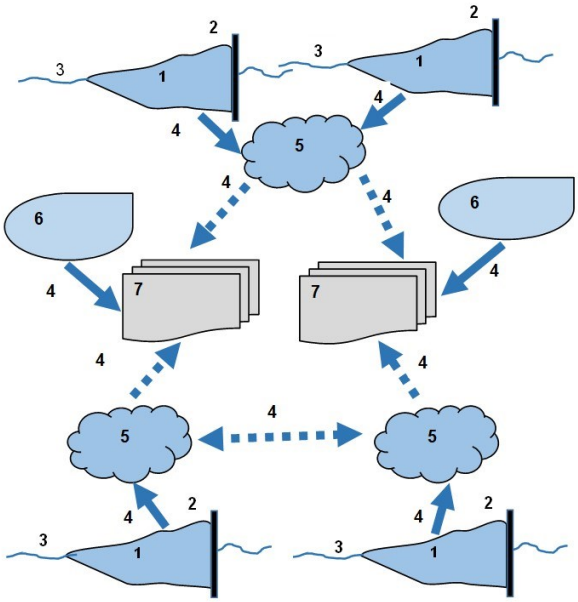


Рисунок 3. Схема воднoресурсной логистической сети. Обозначения те же что и на рисунке 2
Figure 3. Scheme of the water-resource logistic network. The same designations are used as in Figure 2

Рассматривая проблемы создания и развития трасс воднoресурсной логистики для водоснабжения мегаполисов, необходимо еще раз обратить внимание на связанные с ними вопросы институционального характера. Кризисные явления в сфере водоснабжения мегаполисов проявляются все в большем количестве регионов. Этот процесс неизбежен и обусловлен не только гидроклиматическими явлениями, но и такими неотъемлемыми атрибутами современной цивилизации, как урбанизация и стремительный рост народонаселения, которые приводят к возникновению и быстрому росту мегаполисов, особенно в странах так называемого Глобального Юга. Потребность в пресной воде, пригодной для хозяйственно-бытового употребления, во многих из них уже сейчас не может быть обеспечена собственными ресурсами. В тоже время существуют государства, которые без ущерба для себя могут экспортировать определенную часть принадлежащих им запасов воды. Они становятся регуляторами международного рынка водных ресурсов, что не только приносит экономическую выгоду, но и укрепляет геополитические позиции. По этой причине государства, контролирующие поставки воды в другие страны, называются «гидрогегемонами» (hydro-hegemon) [Суздалева, 2017; 2020]. Ими стремятся стать КНР, США и страны ЕС, которые инвестировали огромные средства в строительство трасс воднoресурсной логистики не только на своей территории, но и далеко за ее пределами с целью установить контроль за водоснабжением других государств и даже их региональных групп. Важнейшим аспектом данной деятельности является возможность управлять социальной обстановкой в мегаполисах этих стран и влиять на принятие политических решений.

Россия, обладающая огромными водными ресурсами, часть из которых можно обосновано отнести к МВР (особенно на фоне участившихся катастрофических наводнений), не приобретает

статус гигрогегемона во многом по причине противодействия со стороны лиц и организаций, не желающих воспринимать существующие реалии в этой области и тенденции их развития. Отдаленность от стран глобально юга, в наибольшей степени испытывающих водный дефицит в период потепления климата, не является непреодолимым препятствием. Нефтегазопроводы, по которым из России транспортируются ресурсы углеводородного сырья, имеют сравнимую протяженность.

Для объективной оценки проблемы экологических аспектов трансграничной торговли водными ресурсами также следует вспомнить, что они, в отличие от экспортируемых Россией различных видов минерального сырья и нефтепродуктов, не являются скоплениями вещества, зафиксированного в определенных пластах земной коры, запасы которых ограничены. Водные ресурсы – это некоторая часть глобального круговорота воды, которая лишь в данный конкретный момент времени присутствует на том или ином участке поверхности планеты. Например, воды, наполняющие русло реки, за некоторое время до этого испарились с поверхности океана и выпали в виде осадков на территории водосборного бассейна. В конечном итоге через относительно небольшой промежуток времени практически весь объем речных вод возвращается в Мировой океан. В глобальной круговорот вовлечены и подземные воды. Таким образом, оценивая водные ресурсы страны, мы устанавливаем сток рек, вместимость котловин озер и водохранилищ, а также запасы водоносных пластов. С этой точки зрения строительство сетей водноресурсной логистики, в том числе осуществляемое в рамках урбоклиматических проектов в сфере водоснабжения мегаполисов, – это создание гидротехнических систем, предназначенных для обеспечения устойчивого развития человечества [Федоров, Суздалева, 2014].

Выводы

1. В период глобального потепления наблюдается тенденция увеличения частоты и масштабов гидроклиматических флуктуаций, вызывающих нарушение работы систем водоснабжения мегаполисов, последствия которых позволяют рассматривать такие события как чрезвычайные ситуации.

2. Для предотвращения крупномасштабных социальных катастроф необходимо заблаговременно разработать и реализовать урбоклиматические проекты, целью которых является обеспечение устойчивого водоснабжения крупных городов при наблюдающемся в период потепления климата изменении водности речных бассейнов.

3. В качестве урбоклиматических проектов, осуществляемых для предотвращения чрезвычайных ситуаций в водоснабжении мегаполисов, следует рассматривать строительство трасс водноресурсной логистики, по котором вода из регионов, обладающих избытком водных ресурсов, перемещается в регионы, испытывающие их дефицит.

4. Межбассейновому (межрегиональному) перемещению при создании трасс водноресурсной логистики подлежат только паводковые воды, вызывающие наводнения, наносящие значительный экономический и экологический ущерб.

5. Российская Федерация, обладая большими запасами водных ресурсов, должна стать полноценным участником формирующегося международного рынка водных ресурсов и войти в число стран-гигрогегемонов, осуществляющих проектирование и строительство трансграничных трасс водноресурсной логистики.

Литература

Безносов В.Н., Суздалева А.Л., Алборов И.Д., Цховребов Э.С., Филиппова О.П. Лолаев А.Б. Проблемы экологической безопасности техногенных объектов в условиях деградации многолетней мерзлоты // Вестник евразийской

References

AghaKouchak A., Chiang F., Huning L.S., Love C.A., Mallakpour I., Mazdiyasni O., Moftakhari H., Papalexiou S.M., Ragno E., Sadegh M. Climate Extremes and Compound Hazards in a Warming World. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2020, vol. 48, pp. 519–548.

науки. 2024. Т. 16. № 2. URL: https://esj.today/PDF/98SAVN224.pdf.

Березнер А.С. Территориальное перераспределение речного стока европейской части РСФСР. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 160 с. http://cawater-info.net/library/rus/hist/berezner.pdf.

Долгоносов Б.М. Барьерная роль водопроводных станций в условиях повышенного загрязнения водоисточников // Водоочистка. 2008. № 2. С. 59–68. https://www.elibrary.ru/tlmpmf.

Евтодиенко А.М., Здольник Т.Д. Биологическая контаминация воды водных объектов России и ее эпидемиологическое значение// Российский вестник гигиены. 2022. № 2. С. 8–12. DOI: 10.24075/rbh.2022.046.

Зиядуллаев С.К., Лапкин К.И., Пугачев А.В., Рахимов Э.Д. Социально-экономические проблемы переброски части стока сибирских рек в Среднюю Азию и Казахстан. Ташкент: Изд-во «Фан», 1979. 63 с. http://cawater-info.net/library/hist-s.htm.

Сазонова О.В., Тупикова Д.С., Рязанова Т.К., Гаврюшин М.Ю., Фролова О.В., Трубецкая С.Р. К оценке качества питьевого водоснабжения различных регионов Российской Федерации // Российский вестник гигиены. 2022. № 2. С. 4–7. DOI:10.24075/rbh.2022.043.

Суздалева А.Л. Гидротехническое строительство при организации рынка ресурсов пресной воды // Гидротехническое строительство. 2015. № 9. С. 48–54. https://www.elibrary.ru/uzmkij.

Суздалева А.Л. Водноресурсная логистика: международные аспекты // Мировая экономика и международные отношения. 2017. Т. 61. № 11. С. 5–12. DOI:10.20542/0131-2227-2017-61-11-5-12.

Суздалева А.Л. Россия и глобальный водный кризис // Мировая экономика и международные отношения. 2020. Т.64. №4. С. 53–59. DOI:10.20542/0131-2227-2020-64-4-53-59.

Суздалева А.Л. Биолого-социальные чрезвычайные ситуации // Естественные и технические науки. 2022а. № 8(171). С. 114–115. DOI:10.25633/ETN.2022.08.08.

Суздалева А.Л. Строительство водных депозитариев // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2022б. № 1. С. 13–19. DOI:10.31857/S0869780922010131.

https://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev-earth-071719-055228.

Balaei B., Wilkinson S., Potangaroa R., McFarlane P. Investigating the technical dimension of water supply resilience to disasters. *Sustainable Cities and Society*, 2020, vol. 56, 102077. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2210670720300640.

Berezner A.S. *Territorial'noe pereraspredelenie rechnogo stoka evropejskoj chasti RSFSR [Territorial redistribution of river flow in the European part Russian Soviet Federative Socialist Republic]*. L.: Gidrometeoizdat, 1985. 160 p. http://cawater-info.net/library/rus/hist/berezner.pdf.

Beznosov V.N., Suzdaleva A.L., Alborov I.D., Tshovrebov E.S., Filippova O.P. Lolaev A.B. Problems of ecological safety of anthropogenic objects in the conditions of permafrost degradation. *The Eurasian Scientific Journal*, 2024, no. 16(2) https://esj.today/PDF/98SAVN224.pdf.

Biswas R.R., Sharma R., Gyasi-Agyei Y., Rahman A. Urban water security: water supply and demand management strategies in the face of climate change. *Urban water journal*, 2023, vol. 20, no. 6, pp. 723–737. DOI:10.1080/1573062X.2023.2209549.

Dias T.F., Ghisi E. Urban Water Consumption: A Systematic Literature Review. *Water*, 2024, vol. 16, 838.

Dolgonosov B.M. Barrier role of water supply stations in conditions of increased pollution of water sources. *Water purification*, 2008, no. 2, pp. 59–68. https://www.elibrary.ru/tlmpmf.

Elpiner, L.I., Bear, S.A., Zektser, I.S. et al. The effect of water abundance in a territory on the population health. Water Resource, 2007, vol. 34, pp. 340–349 DOI:10.1134/S0097807807030128.

Evtodienko A.M., Zdolnik T.D. Biological contamination of water in Russian water bodies and its epidemiological significance. *Russian bulletin of hygiene*, 2022, no. 2, pp. 8–12. DOI:10.24075/rbh.2022.046.

Fedorov M.P., Suzdaleva A.L. Hydrotechnical construction as a basis for sustainable development. *Hydrotechnical construction*, 2014, no. 11, pp. 27–30. https://www.elibrary.ru/talpwr.

He C., Liu Z., Wu J., Pan X., Fang Z., Li J., Bryan B.A. Future global urban water scarcity and potential

Суздалева А.Л. Климатические проекты: основные виды и их результативность // Вестник евразийской науки. 2023. Т. 15. № 1. URL: https://esj.today/PDF/20NZVN123.pdf.

Суздалева А.Л., Горюнова С.В. Экологические основы формирования международного рынка ресурсов пресной воды // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия экология и безопасность жизнедеятельности. 2014. № 4. С. 85–98. https://www.elibrary.ru/sykqqp.

Суздалева А.Л., Горюнова С.В. Мировой кризис водопотребления: проблемы обеспечения безопасности жизнедеятельности и охраны окружающей среды: монография. М.: МГПУ, 2018. 172 с. https://www.elibrary.ru/ghfhbs.

Суздалева А.Л., Сидоренко А.В. Периодические и хронические чрезвычайные ситуации, обусловленные глобальным потеплением // Естественные и технические науки. 2022. №12(175). С.359–360. https://www.elibrary.ru/dqbwmf.

Федоров М.П., Суздалева А.Л. Гидротехническое строительство как основа устойчивого развития // Гидротехническое строительство. 2014. №11. С.27–30. https://www.elibrary.ru/talpwr.

Эльпинер Л.И., Беэр С.А., Зекцер И.С., Клиге Р.К., Шаповалов А.Е. Влияние обводненности территории на здоровье населения // Водные ресурсы. 2007. Т. 34. № 3. С. 364–374. https://www.elibrary.ru/iagplt.

AghaKouchak A., Chiang F., Huning L.S., Love C.A., Mallakpour I., Mazdiyasni O., Moftakhari H., Papalexiou S.M., Ragno E., Sadegh M. Climate Extremes and Compound Hazards in a Warming World // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 2020. V. 48. P. 519–548. https://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev-earth-071719-055228.

Balaei B., Wilkinson S., Potangaroa R., McFarlane P. Investigating the technical dimension of water supply resilience to disasters // Sustainable Cities and Society. 2020. V. 56. 102077. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2210670720300640.

Biswas R.R., Sharma R., Gyasi-Agyei Y., Rahman A. Urban water security: water supply and demand management strategies in the face of climate change // Urban water journal. 2023. V. 20. N 6. P. 723–737. DOI:10.1080/1573062X.2023.2209549.

solutions. *Nature communications*, 2021, vol. 12, 4667. DOI:10.1038/s41467-021-25026-3.

Huizenga S., Oldenhof L., van de Bovenkamp H., Bal R. Governing the resilient city: An empirical analysis of governing techniques. *Cities*, 2023, vol. 135, 104237. https://ssrn.com/abstract=4034017.

Li Z., Zhao H., Liu J., Zhang J., Shao Z. Evaluation and promotion strategy of resilience of urban water supply system under food and drought disasters. *Scientifc Reports*, 2022, vol. 12, 7404. DOI:10.1038/s41598-022-11436-w.

Liu Y., Zheng H., Zhao J. Reframing water demand management: a new co-governance framework coupling supply-side and demand-side solutions toward sustainability. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2024, vol. 28, pp. 2223–2238. DOI:10.5194/hess-28-2223-2024.

Liu Z., Ying J., He C.,·Guan D., Pan X., Dai Y., Gong B., He K.,·Lv C., Wang X., Lin J., Liu Y., Bryan B.A. Scarcity and quality risks for future global urban water supply. *Landscape Ecology*, 2024, vol. 39, 10. DOI:10.1007/s10980-024-01832-0.

Maskey G., Pandey, C.L., Giri M. Water scarcity and excess: water insecurity in cities of Nepal. *Water Supply*, 2023, vol. 23, no. 4, pp. 1544–1556. https://iwaponline.com/ws/article/23/4/1544/94014/Water-scarcity-and-excess-water-insecurity-in.

McDonald R.I., Green P., Balk D., Feketeb B.M., Revenga C., Todd M., Montgomery M. Urban growth, climate change, and freshwater availability. *PNAS*, 2011, vol. 108, no. 15, pp. 6312–6317. DOI:10.1073/pnas.1011615108.

McDonald R.I., Weber K., Padowski J., Florke M., Schneider C., Green P. A., Gleeson T., Eckman S., Lehner B., Balk D., Boucher T., Grill G., Montgomery M. Water on an urban planet: Urbanization and the reach of urban water infrastructure. *Global Environ. Change*, 2014, vol. 27, pp. 96–105. DOI:10.1016/j.gloenvcha.2014.04.022.

McDonald R.I., Weber K.F., Padowski J., Boucher T., Shemie D. Estimating watershed degradation over the last century and its impact on water-treatment costs for the world's large cities. *PNAS*, 2016, vol. 113, no. 32, pp. 9117–9122. DOI:10.1073/pnas.1605354113.

Nriagua J., Darroudi F., Shomar B. Health effects of desalinated water: Role of electrolyte disturbance in cancer development. *Environmental*

Dias T.F., Ghisi E. Urban Water Consumption: A Systematic Literature Review // Water. 2024. V. 16. 838. DOI:10.3390/w16060838.

He C., Liu Z., Wu J., Pan X., Fang Z., Li J., Bryan B.A. Future global urban water scarcity and potential solutions // Nature communications. 2021. V. 12. 4667. DOI:10.1038/s41467-021-25026-3.

Huizenga S., Oldenhof L., van de Bovenkamp H., Bal R. Governing the resilient city: An empirical analysis of governing techniques // Cities. 2023. V. 135. 104237. https://ssrn.com/abstract=4034017.

Li Z., Zhao H., Liu J., Zhang J., Shao Z. Evaluation and promotion strategy of resilience of urban water supply system under food and drought disasters // Scientifc Reports. 2022. V. 12. 7404. DOI:10.1038/s41598-022-11436-w.

Liu Y., Zheng H., Zhao J. Reframing water demand management: a new co-governance framework coupling supply-side and demand-side solutions toward sustainability // Hydrology and Earth System Sciences. 2024. V. 28. P. 2223–2238. DOI:10.5194/hess-28-2223-2024.

Liu Z., Ying J., He C.,·Guan D., Pan X., Dai Y., Gong B., He K.,·Lv C., Wang X., Lin J., Liu Y., Bryan B.A. Scarcity and quality risks for future global urban water supply // Landscape Ecology. 2024. V. 39. 10. DOI:10.1007/s10980-024-01832-0.

Maskey G., Pandey, C.L., Giri M. Water scarcity and excess: water insecurity in cities of Nepal // Water Supply. 2023. V. 23. N. 4. P. 1544–1556. https://iwaponline.com/ws/article/23/4/1544/94014/ Water-scarcity-and-excess-water-insecurity-in.

McDonald R.I., Green P., Balk D., Feketeb B.M., Revenga C., Todd M., Montgomery M. Urban growth, climate change, and freshwater availability //PNAS. 2011. V. 108. N 15. P. 6312–6317. DOI:10.1073/pnas.1011615108.

McDonald R.I., Weber K., Padowski J., Florke M., Schneider C., Green P. A., Gleeson T., Eckman S., Lehner B., Balk D., Boucher T., Grill G., Montgomery M. Water on an urban planet: Urbanization and the reach of urban water infrastructure // Global Environ. Change. 2014. V. 27. P. 96–105. DOI:10.1016/j.gloenvcha.2014.04.022.

McDonald R.I., Weber K.F., Padowski J., Boucher T., Shemie D. Estimating watershed degradation over the last century and its impact on water-treatment costs for the world's large cities // PNAS. 2016. V. 113. N 32. P. 9117–9122. DOI:10.1073/pnas.1605354113.

Research, 2016, vol. 150, pp. 191–204. DOI:10.1016/j.envres.2016.05.038.

Quandt A., O'Shea B., Oke S., Ololade O.O. Policy interventions to address water security impacted by climate change: Adaptation strategies of three case studies across different geographic regions. *Front. Water*, 2022, no. 4, 935422. DOI:10.3389/frwa.2022.935422.

Salehi M. Global water shortage and potable water safety; Today's concern and tomorrow's crisis. *Environment International*, 2022, vol. 158, 106936. DOI:10.1016/j.envint.2021.106936.

Santa-Cruz S., Fernández de Córdova G., Vilela M., Pajuelo J., Santa-María M., Muñoz K. Spatial analysis for water supply in seismic emergencies: the Lima-Callao metropolitan area. *Front. Built Environ*, 2024, vol. 10, 1385476. DOI:10.3389/fbuil.2024.1385476.

Sazonova O.V., Tupikova D.S., Ryazanova T.K., Gavryushin M.Yu., Frolova O.V., Trubetskaya S.R. Assessing quality of drinking water supply in different regions of the Russian Federation. *Russian bulletin of hygiene,* 2022, no. 2, pp. 4–7. DOI:10.24075/rbh.2022.043.

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

Siddik M.A.B., Dickson K.E., Rising J., Ruddell B.L., Marston L.T. Interbasin water transfers in the United States and Canada. *Scientific Data*, 2023, vol. 10, 27. DOI:10.1038/s41597-023-01935-4.

Stallkamp C., Diehlmann F., Lüttenberg M., Wiens M., Volk R., Schultmann F. On the combination of water emergency wells and mobile treatment systems: a case study of the city of Berlin. *Annals of Operations Research*, 2022, vol. 319, pp. 259–290. DOI:10.1007/s10479-020-03800-8.

Suzdaleva A. Russia and global water crisis. *World economy and international relations*, 2020, vol. 64, no. 4, pp. 53–59. DOI:10.20542/0131-2227-2020-64-4-53-59.

Suzdaleva A. Water resources logistics: international dimension. *World economy and international relations*, 2017, vol. 61, no. 11, pp. 5–12. DOI:10.20542/0131-2227-2017-61-11-5-12.

Nriagua J., Darroudi F., Shomar B. Health effects of desalinated water: Role of electrolyte disturbance in cancer development // Environmental Research. 2016. V. 150. P. 191–204. DOI:10.1016/j.envres. 2016.05.038.

Quandt A., O'Shea B., Oke S., Ololade O.O. Policy interventions to address water security impacted by climate change: Adaptation strategies of three case studies across different geographic regions // Front. Water. 2022. N 4. 935422. DOI:10.3389/frwa.2022.935422.

Salehi M. Global water shortage and potable water safety; Today's concern and tomorrow's crisis // Environment International. 2022. V. 158. 106936. DOI:10.1016/j.envint.2021.106936.

Santa-Cruz S., Fernández de Córdova G., Vilela M., Pajuelo J., Santa-María M., Muñoz K. Spatial analysis for water supply in seismic emergencies: the Lima-Callao metropolitan area // Front. Built Environ. 2024. V. 10. 1385476. DOI:10.3389/fbuil.2024.1385476.

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

Siddik M.A.B., Dickson K.E., Rising J., Ruddell B.L., Marston L.T. Interbasin water transfers in the United States and Canada // Scientific Data. 2023. V. 10. 27. DOI:10.1038/s41597-023-01935-4.

Stallkamp C., Diehlmann F., Lüttenberg M., Wiens M., Volk R., Schultmann F. On the combination of water emergency wells and mobile treatment systems: a case study of the city of Berlin // Annals of Operations Research. 2022. V. 319. P. 259–290. DOI:10.1007/s10479-020-03800-8.

Szpak D., Szczepanek A. A new method of water supply in crisis situation // Water. 2023. V. 15. 3160. DOI:10.3390/w15173160.

Turner S.W.D., Rice J.S., Nelson K.D., Vernon C.R., McManamay R., Dickson K., Marston L. Comparison of potential drinking water source contamination across one hundred U.S. cities // Nature communications. 2021. V. 12. 7254. DOI:10.1038/s41467-021-27509-9.

Wu C., Cenci J., Wang W., Zhang J. Resilient City: Characterization, Challenges and Outlooks // Buildings. 2022. V. 12. 516. DOI:10.3390/buildings12050516.

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

Suzdaleva A.L. Climate actions: main types and their effectiveness. *The Eurasian scientific journal*. 2023; no. 15(1). https://esj.today/PDF/20NZVN123.pdf. https://esj.today/PDF/20NZVN123.pdf.

Suzdaleva A.L. Construction of water storage facilities // *Geoekologiya. Inzheneraya geologiya, gidrogeologiya,geokriologiya*, 2022б, no. 1, pp. 13–19. DOI:10.31857/S0869780922010131.

Suzdaleva A.L. Hydrotechnical construction in the organization of the fresh water resources market. *Hydrotechnical construction*, 2015, no. 9, pp. 48–54. https://www.elibrary.ru/uzmkij.

Suzdaleva A.L., Goryunova S.V. Ecological foundations of international fresh water resources market formation. RUDN journal of ecology and life safety, 2014, no. 4, pp. 85–98. https://www.elibrary.ru/sykqqp.

Suzdaleva A.L., Goryunova S.V. *Global water crisis: life safety and environmental protection*. Moscow. Moscow city pedagogical university Publishing, 2018. 172 p. https://www.elibrary.ru/ghfhbs.

Suzdaleva A.L., Sidorenko A.V. Periodic and chronic global warming emergencies. *Natural and technical sciences,* 2022, no. 12(175), pp. 359–360. https://www.elibrary.ru/dqbwmf.

Szpak D., Szczepanek A. A new method of water supply in crisis situation. *Water*, 2023, vol. 15, 3160. DOI:10.3390/w15173160.

Turner S.W.D., Rice J.S., Nelson K.D., Vernon C.R., McManamay R., Dickson K., Marston L. Comparison of potential drinking water source contamination across one hundred U.S. cities. *Nature communications*, 2021, vol. 12, 7254. DOI:10.1038/s41467-021-27509-9.

Wu C., Cenci J., Wang W., Zhang J. Resilient City: Characterization, Challenges and Outlooks. *Buildings*, 2022, vol. 12, 516. DOI:10.3390/buildings12050516.

Yu T., Lu B., Jiang H., Liu Z. Study on seismic risk assessment model of water supply systems in mainland China. Natural Hazards Earth System Science, 2024, vol. 24, pp. 803–822. DOI:10.5194/nhess-24-803-2024.

Zhang Z., Shi M., Chen K.Z., Yang H., Wang S. Water scarcity will constrain the formation of a world-

Yu T., Lu B., Jiang H., Liu Z. Study on seismic risk assessment model of water supply systems in mainland China // Natural Hazards Earth System Science. 2024. V. 24. P. 803–822. DOI:10.5194/nhess-24-803-2024.

Zhang Z., Shi M., Chen K.Z., Yang H., Wang S. Water scarcity will constrain the formation of a world-class megalopolis in North China // NPJ Urban Sustainability. 2021. V. 1. 13. DOI:10.1038/s42949-020-00012-8.

Zhou B.-Y., Fang G.-H., Li X., Zhou J., Zhong H.-Y. Joint optimal operation of the South-to-North Water Diversion Project considering the evenness of water deficit // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2024. V. 28. P. 817–832. DOI:10.5194/hess-28-817-2024.

class megalopolis in North China. *NPJ Urban Sustainability*, 2021, vol. 1, 13. DOI:10.1038/s42949-020-00012-8.

Zhou B.-Y., Fang G.-H., Li X., Zhou J., Zhong H.-Y. Joint optimal operation of the South-to-North Water Diversion Project considering the evenness of water deficit. *Hydrol. Earth Syst. Sci*, 2024, vol. 28, pp. 817–832. DOI:10.5194/hess-28-817-2024.

Ziyadullaev S.K., Lapkin K.I., Pugachev A.V., Rahimov EH.D. *Social'no-ehkonomicheskie problemy perebroski chasti stoka sibirskih rek v Srednyuyu Aziyu i Kazahstan [Social and Economic Problems of Transfer of a Part of a Drain of the Siberian Rivers to Central Asia and Kazakhstan].* Tashkent: Fan Publishing, 1979. 63 p. http://cawater-info.net/library/hist-s.htm.

УДК 621.039 (58:7)
DOI: 10.34753/HS.2024.6.1.52

ИЗУЧЕНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ БАРЬЕРОВ БЕЗОПАСНОСТИ ДЛЯ ЗАХОРОНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ НА ПРИМЕРЕ ГЛИНОЗЕМИСТОГО БЕТОНА

М.А. Царев [1,2], И.Ю. Лободенко [1],
А.А. Малофеев[1], Н.Е. Ерёмина [1],
А. Б. Ермолинский [2], М.С. Чернов [2],
Е.Н. Самарин [2], А.П. Пензев [2]
[1] *Федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (ФБУ «НТЦ ЯРБ»), г. Москва, Россия;* [2] *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия*
domikes@gmail.com

Аннотация. Представленная работа − результат изучения фильтрационных свойств материалов инженерных барьеров безопасности для пункта приповерхностного захоронения радиоактивных отходов 3 и 4 классов, а также оценки расчетного гидрогеологического моделирования нескольких пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов на соответствие отдельным положениям действующей нормативной документации в области использования атомной энергии. Поскольку состав применяемых материалов для инженерных барьеров безопасности различен, прогнозные расчеты времени деградации материалов с использованием термодинамических констант могут иметь высокую погрешность (300 % и более), а длительный контакт инженерных барьеров безопасности с природными водами или растворами хранилищ, может привести к изменению состава, пористости барьерного материала и, как следствие, к изменению фильтрационных, сорбционных, прочностных свойств и параметров инженерных барьеров безопасности, то подходы к изучению эволюции слабопроницаемых материалов барьеров, при различных инженерно-геологических условиях

INVESTIGATION OF SAFETY BARRIERS FILTRATION PROPERTIES FOR RADIOACTIVE WASTE DISPOSAL ON THE ALUMINA CONCRETE EXAMPLE

Mikhail A. Tsarev[1,2], Ivan Yu. Lobodenko [1],
Alexey A. Malofeev [1], Nadezhda E. Eremina [1],
Andrey B. Ermolinsky [2], Mikhail S Chernov [2],
Eugene N. Samarin [2], Anton P. Penzev [2]
[1] *Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety, Moscow, Russia;* [2] *Faculty of Geology Lomonosov Moscow State University; Moscow, Russia*

domikes@gmail.com

Abstract. The presented work is the result of studying the filtration properties of engineering safety barriers materials for Class 3 and 4 near-surface radioactive waste disposal facility, as well as the assessment of computational hydrogeological modeling of several near-surface radioactive waste disposals for compliance with certain provisions of the current regulatory documentation in the field of atomic energy use. Since the composition of the materials used for barriers materials is different, predictive calculations of material degradation time using thermodynamic constants can have a high margin of error (300 % and more), and long-term contact of barriers materials with groundwaters or storage solutions can result in changes to the composition, porosity, and, consequently, the filtration, sorption, strength properties of the barrier material. Approaches to studying the evolution of weakly permeable barriers materials under varying engineering-geological conditions over the long-term application of barriers materials require further development. In the present work a methodical approach to long-term filtration experiments in barriers samples is proposed, on the example of cement stone modified with clay additive, the results of filtration flow rate data through the sample are

Tsarev M. A., Lobodenko I. Yu., Malofeev A. A., Nadezhda E. E., Ermolinsky A. B., Chernov M. S., Samarin E. N., Penzev A. P. Investigation of safety barriers filtration properties for radioactive waste disposal on the alumina concrete example. *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2024, vol. 6, iss. 1, pp. 52−75. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2024.6.1.52.

на период долгосрочного применения инженерных барьеров безопасности, требуют проработки.

Предложен методический подход к длительным фильтрационным опытам в образцах инженерных барьеров безопасности, на примере цементного камня, модифицированного добавкой глины, представлены результаты регистрации расхода фильтрации через образец, после чего выполнена оценка изменения состава образца и структуры его порового пространства.

Применена модель равновесного растворения для расчета обратной задачи − по времени растворения гидроксида кальция в образце на момент возросшего расхода фильтрации оценена потеря кальция в твердой фазе, с учетом чего выполнен прямой расчет − времени деградации барьера нужной толщины при скорости фильтрации возможной в условиях захоронения. Изменение свойств материалов в ИББ, показанное в настоящей работе согласуются с работами других исследователей, а подход может успешно применяться для изучения эволюции барьерных материалов − подтверждения срока службы инженерных барьеров безопасности и обоснования интенсивности выхода радионуклидов за их пределы. Работа демонстрирует методическую возможность оценки длительной устойчивости изолирующих свойств барьеров с учетом экспериментальных данных и моделирования кинетики растворения компонентов. Экспериментальные оценки являются основным источником информации в отношении обоснования срока службы барьеров безопасности.

Ключевые слова: эволюция барьерных материалов; внешние воздействия; противофильтрационный экран; противофильтрационная завеса; захоронение радиоактивных отходов; коэффициент фильтрации.

presented, after which the changes in the sample composition and its pore space structure are evaluated. The present work shows an attempt to apply the equilibrium dissolution model to calculate the inverse problem – calcium loss in the solid phase is estimated by the dissolution time of calcium hydroxide at the moment of increased filtration flow rate, and then a direct calculation of the degradation time of the barrier of the required thickness at the filtration rate possible under burial conditions is performed. The change of properties in barriers shown in the present work agree with the works of researchers, the approach can be useful and can be applied to study the evolution of barrier materials to confirm the lifetime of barriers and justify the intensity of radionuclide release beyond their limits. The work demonstrates the methodological possibility of estimating the long-term stability of the insulating properties of barriers, considering experimental data and modeling of the kinetics of dissolution of components. Experimental evaluations are the main source of information regarding the justification of the service life of safety barriers.

Keywords: evolution of barrier materials; external influences; anti-filtration screen; anti-filtration curtain; disposal of radioactive waste; filtration coefficient.

Введение

При выборе материалов инженерных барьеров безопасности (ИББ) для исключения выхода радионуклидов или загрязняющих веществ в геологическую среду, в том числе в подземные воды, необходимо подтверждение

устойчивости защитных свойств материалов ИББ для условий конкретного пункта приповерхностного захоронения радиоактивных отходов (ППЗРО) или объекта, содержащего загрязняющие вещества, учитывая максимально приближенные к инженерно-геологическому массиву условия. Необходимость учета устойчивости фильтрационных свойств в общем виде отражена в нормативной документации различного уровня[1,2,3,4,5].

Обоснованный учет изменения фильтрационных и миграционных параметров не может быть произведен без экспериментального подтверждения. С нашей точки зрения, в период долгосрочной эксплуатации ИББ могут изменять свои свойства, несовершенство прогнозного гидрогеологического моделирования является следствием неопределенности в параметрах и факторах: не учтённых изменчивости во времени фильтрационных и сорбционных свойств ИББ, взаимовлияния материалов с изменением их свойств, параметров внешних воздействий (влияния процессов природного и техногенного характера на материалы ИББ).

В условиях сжатых сроков, устанавливаемых на лабораторные испытания при проектировании ИББ, миграционные свойства зачастую оцениваются без фильтрации через материал, на образцах нарушенного сложения и неоптимальной плотности[6] [Царев, 2024]. Все это ускоряет проведение опытов, но завышает значения параметров сорбции, снижая консервативность прогнозных расчетов геомиграции. Изменение пористости в образце материала ИББ во времени определяет как фильтрационные параметры – коэффициент фильтрации ($K_ф$), коэффициент проницаемости ($K_п$), гравитационную и упругую водоотдачу (μ), (μ^*), так и миграционные параметры – коэффициенты распределения ($K_д$) и диффузии (D). Таким образом, изменение фильтрационных свойств может служить индикатором перераспределения пористости.

Долговечность бетона, используемого в качестве одного из ИББ, зависит от стойкости к внешним воздействиям его цементной матрицы и заполнителей, которые могут обладать различной устойчивостью к тем или иным воздействиям [Царев, 2024]. По результатам исследования [МАГАТЭ, 2016] известно, что фактор просачивания влаги в бетонную конструкцию запускает механизм выщелачивания и высолообразования, что приводит к повышению пористости и, как следствие, проницаемости материала. Потенциальными местами деградации в таком случае являются трещины и участки с высокой перколяцией влаги. Воздействие щелочей и сульфатов из почвы приводит к сульфатной коррозии, что в свою очередь определяет изменение объема и вызывает локальное растрескивание материала. Как показано в работе [Воронков, 2013], должное внимание следует уделить выбору заполнителей. Сочетание реакционной способности заполнителя с высоким уровнем влажности и воздействие щелочей влечет за собой набухание этого заполнителя, растрескивание материала и высолообразование [Воронков, 2013]. Скорость деградации бетона связана с процессами миграции газов и влаги через поры, микротрещины и границы раздела фаз цементного камня и заполнителей бетона, что повышает важность качества защитного слоя бетона, а также изоляционных материалов в решении задач обеспечения долговечности бетонных конструкций. Например, в щелочно-кремнеземной реакции (ASR), где реакционная среда – вода, продуктом реакции является гидрат силиката кальция или гидрат силиката

[1] НП-055-14. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности».

[2] НП-069-14. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Приповерхностное захоронение радиоактивных отходов. Требования безопасности».

[3] РБ-117-16. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии «Оценка долговременной безопасности пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов».

[4] СП 22.13330.2016 Основания зданий и сооружений.

[5] СП 58.13330.2019 Гидротехнические сооружения. Основные положения.

[6] ГОСТ 22733-2016 Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности Г.

кальция/натрия [Dron, 1992]. Щелочи присутствуют в цементе в виде оксидов натрия и калия. Эти оксиды первоначально находятся в безводных фазах цемента, а затем растворяются в поровой жидкости в процессе гидратации до $Na^+ + OH^-$ и $K^+ + OH^-$, образуя гидроксильные ионы натрия или калия соответственно. Поскольку эти ионы не являются составляющими процесса гидратации цемента, они накапливаются в поровом растворе, следовательно, сами щелочи не участвуют в реакции.

Возможное изменение свойств ИББ со временем заставляет задуматься о развитии подхода к изучению эволюции искусственно созданных барьеров безопасности (бетон отсеков ППЗРО и контейнеров, буферных материалов, глиняного экрана), при этом под «эволюцией» ИББ в геологическом массиве в этой работе понимается долговременное сохранение барьерами необходимых противофильтрационных и сорбционных свойств в заданный период времени. Можно сказать, что воздействия, изменяющие изолирующие свойства ИББ (сорбирующая способность, фильтрационное сопротивление) проявляются в течение длительного времени (например, растворение и замещение минералов, биологические процессы, ведущие к изменению пористости и активной поверхности) или же проявляются как условно кратковременные (например, воздействие опасных геологических процессов таких как сейсмотектонические, карстовые, склоновые). Отдельно можно выделить циклически проявляющиеся процессы, ведущие к изменению свойств ИББ (например, геокриологические процессы промерзания-оттаивания, возможные в верхней части ППЗРО). Таким образом, устойчивость изолирующих свойств ИББ зависит от его пространственного положения в геологическом массиве, времени, интенсивности и повторяемости воздействий природных и техногенных процессов, явлений и факторов. Вопросы о сроках службы ИББ рассматриваются в литературе [Jacques, 2013; Игин, 2022; Лаверов, 2008; Сорокин, 2022] и, по всей видимости, требуют уточнения для конкретных материалов.

Исследования, представленные в настоящей статье, выполнены на примере слабопроницаемого образца бетона на глиноземистом цементе с содержанием бентонитовой глины, в условиях ускоренной фильтрации с постоянным градиентом напора до момента фильтрационной деградации растворения образца, что проявилось в скачкообразном росте его проницаемости. С учетом результатов эксперимента на образце выполнена и расчетная оценка времени деградации фильтрационных свойств барьера для условий приближенным к реальным (при меньшей скорости фильтрации и большей толщине барьера).

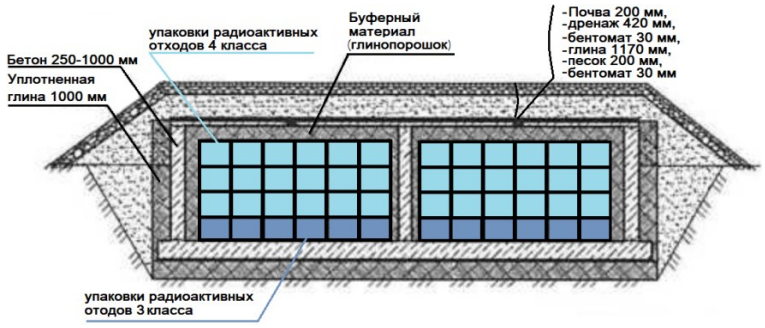


Рисунок 1. Проектная конструкция отсеков ППЗРО
(по материалам статьи [Анисимов, 2022])
Figure 1. The design of the compartments of the near-surface disposal of radioactive waste
(based on the materials of the article [Anisimov, 2022])

Изучение изменения $К_ф$ и химического состава образца, позволило дать методические предложения к оценке эволюции изолирующих свойств материалов в массиве, а также создать подход для решения актуальной практической задачи − выбора материала ИББ и технологии его применения с учетом влияния природных и техногенных процессов на изолирующие

свойства. В работе представлены: предложенный подход к оценке устойчивости изолирующих свойств ИББ на примере образца глиноземистого цементного камня и применяемое оборудование (в том числе созданное самостоятельно), основные результаты эксперимента, рекомендации и предложения по уточнению отдельных положений нормативных документов в области использования атомной энергии.

Необходимые сроки службы ИББ

Требованиями федеральных норм и правил, а также положениями руководств по безопасности[7,8,9] (приложение № 3 к НП 055-14, п. 38 НП-069-14, пп. 47, 50, 52 РБ-117-16), показано, что необходимо обеспечить сохранение изолирующих свойств ИББ для обеспечения долговременной безопасности. Исполнение указанных требований невозможно без предварительно установленных сроков службы ИББ. Вопросы же сроков службы ИББ, неоднократно поднимались в публикациях и статьях, например в [Игин, 2022; Лаверов, 2008; Сорокин, 2022]. Сроки службы ИББ должны быть достаточными для снижения активности отходов при образовании продуктов деления, например в работе [Лаверов, 2008] отмечено, что контейнер для радиоактивных отходов (РАО) должен обеспечивать изоляцию от подземных вод на срок 1000 лет, это обосновано тем что ^{90}Sr и ^{137}Cs, обеспечивающие наибольший уровень радиоактивности в первые сотни лет, практически полностью распадутся, подобный подход может быть справедлив и для ППЗРО с отходами 3 и 4 класса.

В статье [Игин, 2022] рассмотрены сценарии последовательного выхода из строя ИББ, отмечено что изоляция РАО в ППЗРО обеспечивается следующими сроками службы: металлических контейнеров (30–50 лет), железобетонных контейнеров (300 лет), буферного порошка (300–500 лет), бетонных сооружений (100 лет), глиняного экрана (300–500 лет), покрывающего экрана и гидроизолирующего экрана с дренажным и почвенным слоем (300–500 лет).

Так как ИББ должны сохранять изолирующие свойства в период потенциальной опасности захороненных РАО, именно этот срок определяет выбор материала для создания ИББ в условиях его использования. Прогнозные гидрогеологические расчеты выхода загрязнения за пределы ИББ невозможны без понимания срока наступления такого события и активности в источнике на момент его наступления. Возможность деградации материала ИББ (в отдельных случаях и скорость такого процесса) может быть оценена консервативно для конкретных условий.

Пространственное положение ИББ в массиве

ППЗРО предполагают создание многобарьерной системы (рисунок 1). Каждый барьер сооружается различным способом: природную глину уплотняют в котловане, после чего выполняется заливка бетона, а после загрузки отсеков контейнерами пустоты между ними засыпаются сорбирующей порошковой глиной. Исследования долговечности бетона, как указано в работе [Сорокин, 2022], показывают, что современные технологии позволяют изготавливать его для строительства ответственных зданий и сооружений со сроком эксплуатации до 500 лет, но при этом требуется разработка методического подхода к обоснованию надежности конструкционных материалов (в частности контейнеров для РАО).

Барьеры сооружаются из комбинаций материалов, которые необходимо подбирать так, чтобы сохранялись их сорбирующие и противофильтрационные свойства, в этом состоит работа инженерного барьера, обеспечивающая долговременную безопасность.

[7] НП-055-14. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности».

[8] НП-069-14. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Приповерхностное захоронение радиоактивных отходов. Требования безопасности».

[9] РБ-117-16. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии «Оценка долговременной безопасности пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов».

Физико-химическое преобразование компонентов барьерного материала в конкретных условиях должно изучаться с учетом следующих условий: давления, химического состава, температуры и скорости фильтрации. В условиях фильтрации воды через барьер не должна снижаться его прочность и устойчивость. Оценка конкретных сроков службы материала усложнена, так как имеют место следующие проблемы: отсутствие методического подхода к изучению стабильности изолирующих свойств, сложность выбора и обеспечения условий для оценки фильтрационных и миграционных параметров материала, необходимость учета постоянно действующих, циклических или единовременных воздействий. Например, барьерные материалы в течение срока их службы насыщаются водой постепенно, при этом в работе [Иванов, 1994] показано, что коэффициенты диффузии зависят от влажности, что имеет значение для оценки барьерных свойств как в отношении миграции, так и относительно процессов деградации барьерного материала. Другой пример – воздействие геокриологических процессов.

Пространственное положение ИББ в массиве определяет направление процессов изменения свойств ИББ за длительный период эксплуатации, оно должно учитываться как особенность конкретного ППЗРО. Механизмы деградации бетона с использованием метода ускоренной карбонизации бетона рассмотрены в статье [Medvedev, 2024], где отмечается влияние на деградацию бетона щелочей, кислот, сульфатов и других веществ. По всей видимости, подход к оценке противофильтрационных свойств слабопроницаемых грунтов и материалов ИББ должен учитывать, что на барьерный материал могут воздействовать как растворы внутренней части ППЗРО, так и природные воды (рисунок 2), при этом принципиально возможна разгрузка из сооружения в водоносный горизонт (рисунок 2А) или подтопление сооружения подземными водами (рисунок 2В).

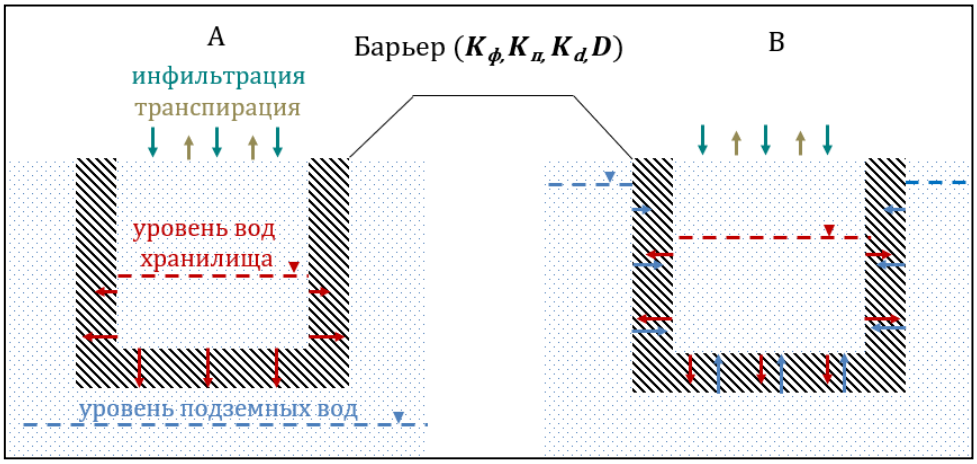


Рисунок 2. Фильтрационные схемы подтопления инженерных барьеров безопасности: А – в условиях фильтрации из сооружения в водоносный горизонт; В – в условиях насыщения из водоносного горизонта внутренней части сооружения (схема М.А. Царева)

Figure 2. Filtration schemes of engineering safety barriers flooding: A – under the condition of filtration from the structure into the aquifer; B – under conditions of saturation from the aquifer in the interior of the structure (scheme by M.A. Tsarev)

Миграция загрязнения в подземные воды из хранилища отходов с потоком фильтрующейся воды возможна при возникновении гидравлической связи подземных вод и растворов в пределах ИББ. С нашей точки зрения, ухудшение изолирующих свойств материала будет зависеть от изменения его пористости (при изменении состава и структуры материала). При этом такой процесс зависит от начального состава и структуры образца, напряженно-деформированного состояния в барьере, температурных условий, а также поступления воды определенного состава.

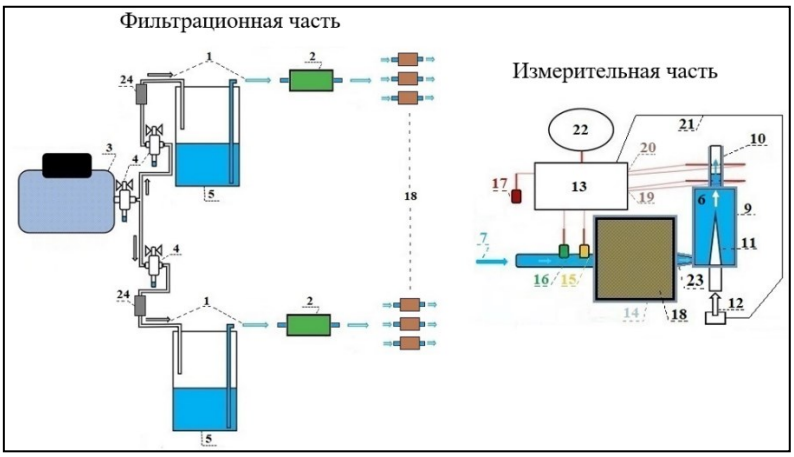


Рисунок 3. Автоматизированный комплекс для фильтрационных и миграционных испытаний в образцах слабопроницаемых материалов: 1 – подача воздуха и воды постоянного давления; температурный регулятор; 3, 12 – компрессор; 4 – регулятор давления воздуха со сборником конденсата; 5 – колба с водой (раствором) заданного давления и температуры; 6 – автоматический расходомер сверхмалых потоков; 7 – источник подачи воды (водопровод, колба); 8 – регулятор давления воды; 9 – приемная камера расходомера; 10 – измерительная трубка; 11 – продувочный клапан; 13 – плата с контроллером; 14 – термоизоляция; 15 – датчик температуры раствора; 16 – датчик давления раствора; 17 – датчик атмосферного давления и температуры; 18 – герметичная емкость с образцом; 19, 20 – вход первой и второй пар электродов через потенциометрический датчик; 21 – управляемое питание малогабаритного компрессора; 22 – персональный компьютер или дисплей с модулем памяти; 23 – вход для подвода фильтрата; 24 – обратный клапан (схема М.А. Царева, Патент РФ № 2819962[10])

Figure 3. Automated complex for filtration and migration tests in samples of weakly permeable materials: 1 – constant pressure air and water supply; temperature regulator; 3, 12 – compressor; 4 – air pressure regulator with condensate collector; 5 – flask with water (solution) of a given pressure and temperature; 6 – automatic ultra–low flow meter; 7 - water supply source (water supply, flask); 8 – water pressure regulator; 9 – flow meter intake chamber; 10 – measuring tube; 11 – purge valve; 13 – board with controller; 14 – thermal insulation; 15 – solution temperature sensor; 16 – solution pressure sensor; 17 – atmospheric pressure and temperature sensor; 18 – sealed container with the test sample; 19, 20 – input of the first and second pairs of electrodes through a potentiometric sensor; 21 – controlled power supply of a small compressor; 22 – personal computer or display with memory module; 23 – inlet for filtrate supply; 24 – check valve (Scheme by M.A. Tsarev, Patent No. 2819962[10])

Разработка автоматизированного комплекса для фильтрационных и миграционных испытаний в образцах слабопроницаемых материалов

Для изучения изолирующих свойств барьеров разработан, опробован и запатентован[10,11] [Царев, 2022] фильтрационный комплекс, показанный на рисунках 3 и 4, работа которого учитывает известные способы исследования фильтрационных свойств слабопроницаемых грунтов и бетонов[12,13] [Гольдберг, 1986; Элбакидзе, 1988]. Комплекс имеет регулируемую подачу жидкости пневматическим способом и снабжён цифровыми датчиками температуры и давления, значения с

[10] Царев М. А., Лободенко И.Ю., Патент РФ № 2819962, 28.05.2024. «Автоматизированный комплекс для проведения фильтрационных и миграционных испытаний образцов пористых материалов».
[11] Царев М. А., Патент РФ № 2803394, 12.09.2023 «Расходомер сверхмалых потоков».
[12] ГОСТ 12730.5-2018 «Бетоны. Методы определения водонепроницаемости».
[13] Standard Test Method for Measurement of Index Flux Through Saturated Geosynthetic Clay Liner Specimens Using a Flexible Wall Permeameter. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959. United States.

которых используются для расчета проницаемости и автоматически считываются при регистрации расхода разработанным расходомером[14], что позволяет одновременно производить опыт на большом количестве образцов, для которых при этом можно задавать разный состав жидкости и её температуру.

Элементы фильтрационного комплекса могут выполняться из различных химически нейтральных полимерных материалов, что позволяет предотвратить на контакте с ними возможные химические реакции, изменение состава жидкости, образование коррозии [Царев, 2024] на контакте с образцом. Фото фильтрационного комплекса представлено на рисунке 4.



Рисунок 4. Автоматизированный комплекс для фильтрационных и миграционных испытаний в образцах слабопроницаемых материалов (фото М.А. Царева)

Figure 4. Automated complex for filtration and migration tests in samples of weakly permeable materials (photo by M.A. Tsarev)

Расходомер установки работает кондуктометрическим способом, одновременно контролирует снятие замеров со всех датчиков и имеет простую конструкцию (рисунок 5): на вход перед расходомером под цифрой (1) приходит фильтрат из испытуемого образца и удаляется через трубку (3), замыкая поочередно инертные электроды (4) и (5), соединенные с контроллером (6), регистрирующим время прохождения жидкости в трубке известного объема.

При замыкании верхней пары электродов (5) производится запись расхода фильтрации и считывание информации со всех датчиков установки, вместе с этим включается продувка измерительной трубки небольшим компрессором (8) через клапан (9) для удаления жидкости из трубки и повторения цикла измерений.

Диаметр трубки и расстояние между электродами можно менять, для опыта была использована трубка диаметром 2 мм с сантиметровым расстоянием между парами электродов. Регистрируемый ею расход за час составляет до 0,0001 см^3/мин.. Учет температуры воды, воздуха, давления раствора на входе в образец и атмосферное давление производится датчиками (5)–(17), представленными на рисунке 3, результаты измерений могут быть представлены в графическом виде (рисунок 6).

[14] Царев М. А., Патент РФ № 2803394, 12.09.2023 «Расходомер сверхмалых потоков».

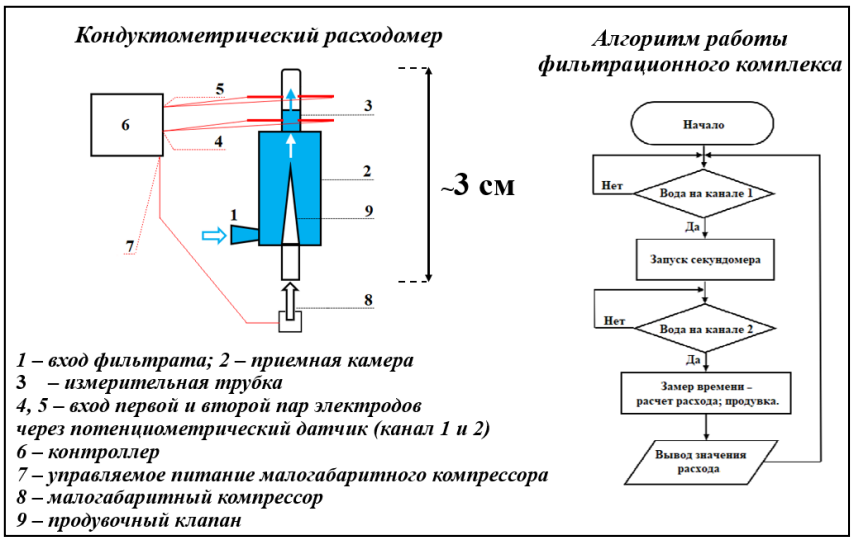


Рисунок 5. Схема работы фильтрационного комплекса с кондуктометрическим расходомером, Патент РФ №2803394[15]

Figure 5. The scheme of operation of the filtration complex with a conductometric flow meter, Patent No. 2803394[16]

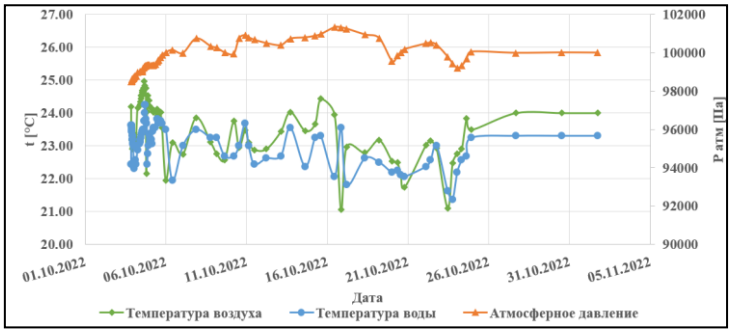


Рисунок 6. Пример регистрации температуры и атмосферного давления для оценки проницаемости (по данным М.А. Царева)

Figure 6. Example of temperature and atmospheric pressure registration for permeability assessment (according to the data by M.A. Tsarev)

При выполнении измерений по показаниям температуры может быть введена поправка для значений $K_ф$, приведеного к температуре 10 °С, требуемая в соответствии с ГОСТ 25584-2016 (Грунты. Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации)[16]. Поправка вводится для сравнения значений $K_ф$ исследуемого образца за длительный период, когда расходы фильтрации сняты при разной температуре. Для точных исследований влияния минерализации и температуры используется характеристика фильтрационного сопротивления – $K_п$ [Д] (Дарси), учитывающая вклад динамической вязкости η [сП], при этом кинематическая вязкость ν [мм^2/с] изучается на вискозиметре при нужной температуре согласно ГОСТ 33768–2015 (Метод определения кинематической вязкости и расчет динамической вязкости прозрачных и непрозрачных жидкостей)[17].

Подход к оценке устойчивости изолирующих свойств ИББ на примере образца глиноземистого цементного камня

Долговременная изолирующая способность инженерного барьера обеспечивается как

[15] Царев М. А., Патент РФ № 2803394, 12.09.2023 «Расходомер сверхмалых потоков».
[16] ГОСТ 25584-2016 «Грунты. Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации».
[17] ГОСТ 33768-2015. «Метод определения кинематической вязкости и расчет динамической вязкости прозрачных и непрозрачных жидкостей».

противофильтрационными, так и сорбирующими свойствами, поэтому независимо от изменений в самом материале эти характеристики барьера должны быть обеспечены на приемлемом уровне в период максимальной активности отходов, исключая выход загрязнения в подземные воды.

В статье Бельгийского центра ядерных исследований [Jacques, 2013] обсуждалась химическая деградация бетона при его выщелачивании атмосферными и грунтовыми водами. Представлены модели химического разложения бетона при фильтрационном выщелачивании с выносом кальция из зоны растворения, а также численный пример применения модели такого разрушения к крупномасштабным бетонным конструкциям. Используемая в [Jacques, 2013] модель описывает взаимные изменения пористости, проницаемости, проводимости и извилистости, вызванные геохимическими реакциями и процессами (минералогическими изменениями). Задаваемая авторами пористость и параметры массопереноса анализируются совместно на предмет чувствительности к изменению скорости деградации. Уравнения термодинамического моделирования выщелачивания кальция реализованы в универсальном симуляторе COMSOL Multiphysics, а результаты моделирования применены к крупномасштабным бетонным конструкциям. В численном примере, приведенном в [Jacques, 2013] задана бетонная конструкция с различной сетью трещин (варианты с низкой и высокой плотностью), расход воды определяется граничными условиями постоянного давления сверху и снизу, предполагается, что переход от низкой к высокой плотности трещин происходит приблизительно через 350 лет. В исследовании [Jacques, 2013] отмечено, что общая водопроницаемость является одним из наиболее важных факторов при рассмотрении деградации бетона, поэтому это свойство указывается как показатель общей деградации, другим показателем степени деградации бетона является общее количество Ca, при этом увеличение сети трещин зависит от исходной гидравлической проводимости матрицы, количества проходящих трещин. Таким образом на модели [Jacques, 2013], реализованной в программном комплексе COMSOL, выполнен расчет увеличения потока воды через бетонный блок в результате выщелачивания кальция с автоматическим обновлением гидравлических и транспортных свойств в зависимости от состояния деградации, для оценки влияния физических (поток) и химических (перенос) изменений на миграцию радионуклидов. Рассчитанное растворение минералов кальция в бетоне привело к увеличению пористости и, следовательно, к увеличению гидравлической проводимости, поток воды через бетонный блок увеличился почти на два порядка, моделирование показало неоднородный характер процесса выщелачивания кальция.

Результаты работы, описанные в настоящей статье, согласуются с изложенными в статье [Jacques, 2013] позициями о том, что:

- при выщелачивании компонентов материала на основе бетона имеет место обновление фильтрационных и миграционных свойств в результате увеличения пористости (геохимическая эволюция);
- геохимическая деградация бетона зависит от состава просачивающейся внешней воды;
- степень химической деградации изучается с точки зрения изменения водопроницаемости, которая рассматривается как один из важнейших показателей общей деградации вместе с общим количеством Ca;
- увеличение сети трещин зависит от исходной проводимости, количества трещин;
- время в течение которого происходит увеличение проводимости, в значительной степени зависит от баланса массы Ca, от его содержания в твердом виде зависят все переменные физические параметры;
- разрушение бетона реализовано на термодинамической модели выщелачивания кальция: его концентрация в жидкой фазе остается постоянной в соответствии с пределом растворимости, для описания соотношения кальция между жидкой и твердой фазами использовано равновесное растворение (без учета кинетики).

Решения [Jacques, 2013] хотя и отражают основные химические процессы разложения бетона, обеспечивая действительно эффективный инструмент для оценки эволюции физических и химических свойств материала, но являются при

этом упрощенной численной синтетической моделью химического разложения материала (в этом случае бетона), где пористость и извилистость задаются вручную и могут не соответствовать реальному материалу. Это же относится к чувствительности скорости химической деградации бетона к составу воды, которая оценивается в статье [Jacques, 2013] путем многократных симуляций.

Предлагаемый в настоящей статье подход также заключается в том, что пористость материала определяет фильтрационные K_ϕ, K_n и емкостные параметры μ, μ^*, поэтому изменение фильтрационного сопротивления образца, зависящее от пористости материала, можно рассчитать по изменению расхода фильтрации через образец. Таким образом возможно оценить пороговое значение пористости, при котором расход фильтрации через барьер, предположительно, начинает резко возрастать в данных условиях фильтрации (при определенном составе образца и фильтрата, при заданной скорости фильтрации), подход с изучением взаимного изменения пористости, проницаемости, проводимости и извилистости в целом использован и авторами [Jacques, 2013] на синтетической модели.

Предлагаемый в настоящей работе подход обеспечивается длительным фильтрационным испытанием образца барьерного материала с постоянным градиентом фильтрации, в ходе такого испытания активная пористость может изменяться. В качестве примера взят образец глиноземистого цементного камня, активная пористость в ходе испытания сначала уменьшалась (в результате гидролиза и перекристаллизации), затем увеличивалась (за счет процессов растворения). С применением оборудования собственной разработки, получившего государственную охрану и проиллюстрированного на рисунках 3–5, в эксперименте с увеличенной скоростью фильтрации через образец глиноземистого цементного камня, показанного на рисунке 7, было зарегистрировано по значениям расхода изменение противофильтрационных свойств со временем, показанное на рисунке 8.

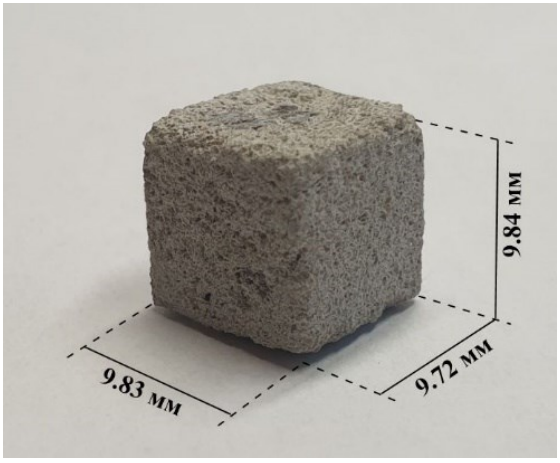


Рисунок 7. Образец глиноземистого цементного камня для пробного опыта

Figure 7. Sample of alumina cement stone for trial experience

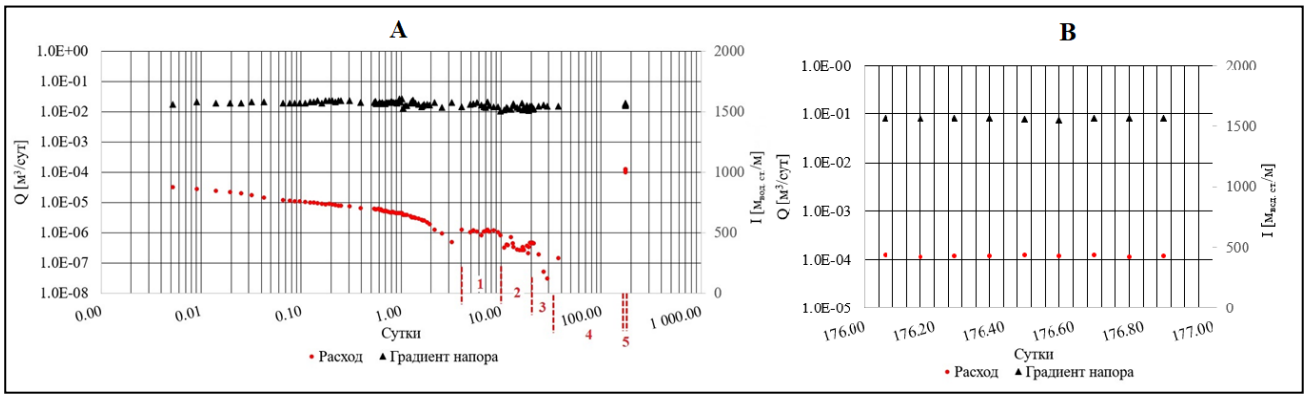


Рисунок 8. Фильтрационный опыт на образце глиноземистого цементного камня на разработанном фильтрационном комплексе с автоматической записью данных: А – логарифмический масштаб времени; В – замеры на завершающем этапе

Figure 8. Filtration experiment on a sample of alumina cement stone on a developed filtration complex with automatic data recording: A – logarithmic time scale; B – measurements at the final filtration stage

Исследуемый образец состоял из мелкозернистого песка (40 % образца), глинозема и оксида кальция, пяти процентов Mg–Na бентонитовой глины (в составе которой преобладает смектит и кремнезем).

Значение $K_ф$ оценено согласно основному закону фильтрации Дарси, первая стабилизация расхода дала значение порядка $8 \cdot 10^{-6}$ м/сут при скорости фильтрации 1 см/сут, на десятые сутки расход упал, предположительно в связи с набуханием или кольматацией в порах, затем последовала стабилизация с меньшей в 2,5 раза скоростью и проницаемостью, после этого через 30 суток наступила полная остановка фильтрации, поэтому на 38-е сутки замеры были прекращены, но само фильтрационное испытание не прерывалось. При обработке результатов, в дальнейшем, отмечен замер расхода на 37-е сутки, который позволяет судить о том, что фильтрация всё же плавно возобновилась после остановки, при этом скорость фильтрации стабилизировалась на значении 120 см/сут, что позднее уже регистрировалось (по замерам в период 176–177 суток). Таким образом, коэффициент фильтрации образца барьерного материала и скорость фильтрации возросли на два порядка. Результаты фильтрационного опыта представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты фильтрационного опыта на глиноземистом цементном камне
Table 1. Results of filtration experiment on aluminous cement stone

Время от начала фильтрации t, сут	V, м/сут	$K_ф$,м/сут	Режим фильтрации
4–10 (1)	$1{,}1 \cdot 10^{-2}$	$8{,}1 \cdot 10^{-6}$	стационарный
10–20 (2)	$3{,}7 \cdot 10^{-3}$	$2{,}6 \cdot 10^{-6}$	стационарный
20–37 (3)	$<10^{-4}$	$<10^{-7}$	остановка
37–176 (4)	$<10^{-7} – 1{,}2$	$<10^{-7} – 7{,}9 \cdot 10^{-4}$	рост скорости
176–177 (5)	1,2	$7{,}9 \cdot 10^{-4}$	стационарный

Анализ изменения химического состава

После фильтрационного опыта, длительностью в полгода, на торце образца со стороны выхода фильтрата отмечены отложения серого оттенка (рисунок 9А). Сухой остаток, образовавшийся при испарении порции самого фильтрата, отобранной на завершающем этапе, имел желтовато-белый цвет (рисунок 9В). Три разные порции мелкодисперсного порошка (из фильтрата, образца после фильтрации, исходного образца) одновременно выдержаны в деионизированной воде, эти пробы жидкости исследованы на масс-спектрометре, результаты представлены на диаграмме (рисунок 9). В каждом образце раствора вытяжки содержание Fe, Cu, Ti, Mn оказалось незначительным (менее 0,25 мг/л), при этом преобладает содержание кальция.

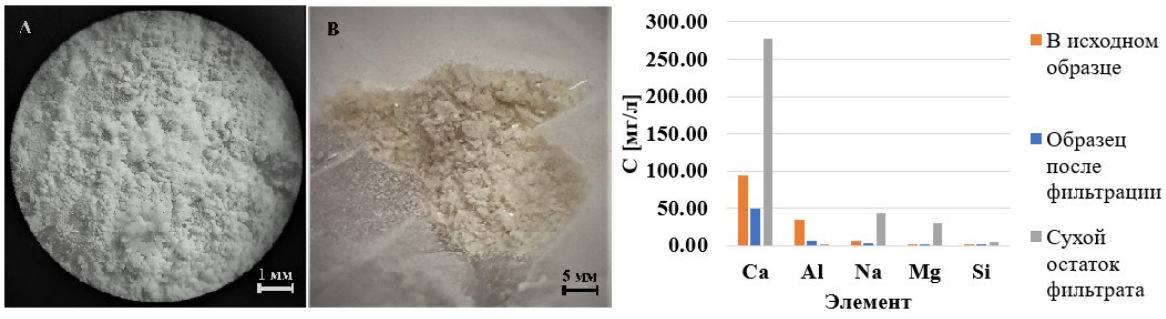


Рисунок 9. Результаты исследования преобладающих катионов в образцах и фото кристаллических продуктов выщелачивания из образца: a – на торце образца; b – из сухого остатка из жидкости фильтрата [Царев, 2023a, 2023b, 2023c]

Figure 9. The results of the predominant cations study in the samples and photos of crystalline leaching products from the sample: a – at the end of the sample; b – from the dry residue from the filtrate liquid [Tsarev, 2023a, 2023b, 2023c]

Параллельно с фильтрационным опытом выполнен и дифференциально-термический анализ (ДТА) исходного образца и образца, отделенного от исходного и прошедшего замачивание до полного водонасыщения (в безнапорных условиях). Такое исследование показывает изменение преобладающих веществ в цементном камне при его взаимодействии с водой в статических (без водообмена) условиях. В ходе ДТА при повышении температуры в интервале 90–140 °C в образце происходит выход свободной межслоевой воды из частиц материала. Температура разложения гидроксида алюминия представлена на графике пиком 230°C. При 575°C имеющийся в образце песок дает термический эффект при переходе в альфа-кварц, а при 760 °C начинается разложение кальцита. Количественные параметры по обоим образцам представлены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты дифференциально термического анализа (ДТА)
Table 2. Results of differential thermal analysis (DTA)

Образец	Потери массы, %			
	$Ca(OH)_2*2H_2O$	$Al(OH)_3$	$CaCO_3$	Суммарные при нагреве до 1000 °C
	90–130 °C	200–230 °C	760–950 °C	
До испытаний	0,43	5,04	3,61	17,23
После испытаний	0,71	5,71	5,53	17,03

Был выполнен термогравиметрический анализ, результат которого представлен в таблице 3 и показал, что за время выдержки в воде образца с идентичным составом наблюдается изменение минералогического состава образца: происходит увеличение содержания карбоната кальция и алюминатов щелочных металлов. Это подтверждает наличие протекающей коррозии в образце.

Таблица 3. Результаты термогравиметрического анализа
Table 3. Results of thermogravimetric analysis

Образец	Исходное содержание, %		
	$Ca(OH)_2*2H_2O$	$Al(OH)_3$	$CaCO_3$
До испытаний	1,75	14,56	8,20
После испытаний	2,89	16,49	12,57

Следует отметить, что термогравиметрический и дифференциально-термический анализы важны для исследований деградации материалов ИББ, в том числе при оценке воздействия на материалы ИББ повышенных температур.

Основным процессом, уменьшающим фильтрационное сопротивление образца вследствие роста его пористости, предположительно, является коррозия выщелачивания. Начальные этапы фильтрационного опыта с увеличением фильтрационного сопротивления, предположительно, сопровождаются гидролизом минералов цементного камня с образованием извести, при этом концентрация $Ca(OH)_2$ в поступающей воде мала:

$$2(3CaO \cdot Al_2O_3) + 6H_2O \rightarrow 3CaO \cdot 2Al_2O_3 \cdot 3H_2O + 3Ca(OH)_2. \quad (1)$$

Таким образом, образовавшаяся известь $Ca(OH)_2$ реагирует растворенными в воде анионами CO^{2-}, HCO^{-3}, CO_3^{2-}, с образованием карбоната кальция $CaCO_3$ и молекулы воды:

$$CO_2 + Ca(OH)_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O. \quad (2)$$

Затем в процессе фильтрационного опыта наступает этап уменьшения фильтрационного сопротивления, вероятной причиной этому служит то, что вода растворяет гидроксид кальция, который далее вымывается из образца и вступает в реакцию с углекислым газом:

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3\downarrow + H_2O. \quad (3)$$

Сухой остаток, показанный на рисунке 9, не содержит алюминий в значительном количестве. Содержание алюминия в исходном образце в разы больше, чем в образце, подвергшемся долговременной фильтрации, предположительно, алюминий вымывался из образца на начальных этапах фильтрации (сбор фильтрата шел с 37-х суток после возросшей скорости фильтрации) согласно реакциям:

$$Al_2O_3 + 6NaOH \rightarrow 2Na_3AlO_3 + 3H_2O$$

$$Al_2O_3 + Na^+ + 6OH \rightarrow 6Na^+ + 2AlO_3^{3-} + 3H_2O \quad (4)$$

$$Al_2O_3 + 6OH \rightarrow 2AlO_3^{3-} + 3H_2O.$$

Указанное предположение согласуется и с концентрациями натрия в исследованных образцах.

Изучение изменения структуры порового пространства глиноземистого бетона при воздействии длительной фильтрации методами томографии и электронной микроскопии

Для изучения порового пространства использован образец инженерного барьера безопасности на основе глиноземистого бетона, разделенный на образец № 1 (не подвергшийся фильтрационному испытанию), и образец № 2 (после 177 суток непрерывного фильтрационного испытания). Целью исследования является изучение изменения структуры и морфологии порового пространства барьерных материалов после испытаний на различные виды воздействий и использование результатов исследований для обоснования долговременной устойчивости изолирующих свойств материалов, используемых при изоляции РАО. Задача исследования состояла в изучении морфологии пор и структуры порового пространства методами компьютерной томографии (КТ) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Продемонстрирована применимость комплексного сравнительного анализа изменений в структуре порового пространства и в морфологии пор барьерных материалов до и после фильтрационных испытаний.

Изучение структуры образцов методом компьютерной томографии. Исследование структуры образцов №№ 1 и 2 выполнено с помощью компьютерного рентгеновского томографа (КТ). На рисунке 10 последовательно представлены: КТ-изображение, модель распределения пор по результатам КТ, а также морфология порового пространства образцов по данным СЭМ.

Результаты исследований показали, что образцы №№ 1 и 2 на начало исследований имели структуру, соответствующую моменту создания исходного образца, а воздействие фильтрующейся воды через материал (образец №2) изменило его строение. При сравнении результатов томографии в образце после фильтрации, показанном на рисунке 10В, наблюдается более высокая контрастность между зернами кварцевого песка и межзерновым пространством, пространством цемента – заполнителя относительно исходного образца (рисунок 10А), что может говорить о частичном разуплотнении межзернового порового пространства в результате его растворения или замещения менее плотным веществом.

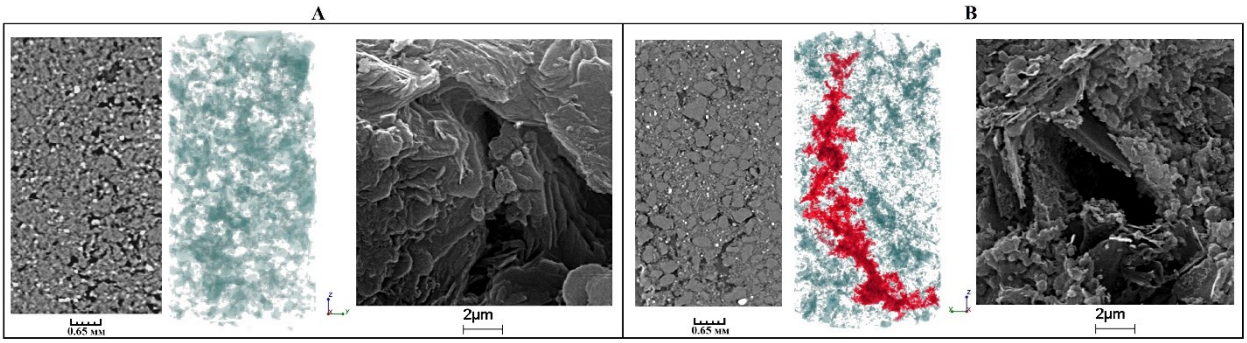


Рисунок 10. Структура образцов по данным КТ и СЭМ: А – образец № 1; Б – образец № 2
Figure 10. Structure of samples according to CT and SEM data: A – sample № 1; B – sample № 2

В образце № 2 после фильтрационного испытания выражен канал (рисунок 10В), при этом образцы №№ 1 и 2 по данным КТ мало отличаются по пористости: изучение структуры образца № 1 (контрольный образец), не подвергшийся фильтрационному испытанию, показало, что он имеет пористость от 6 % до 10 %, а образец № 2 после фильтрационного испытания имеет среднюю пористость 5 %.

Изучение морфологии порового пространства методом электронной микроскопии. Исследование выполнено с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ). Изучению подверглись оба образца №№ 1 и 2. В образце бетона, через поровое пространство которого фильтровалась вода, наблюдаются изменения как морфологии отдельных пор, так и структуры порового пространства в целом. Результаты съемок (микроскопии) сколов двух образцов приведены на рисунке 10.

Результаты СЭМ показали, что крупные поры контрольного образца № 1 (рисунок 10А) заполнены мелкими чешуйчатыми частицами и микроагрегатами из них, при этом в структуре образца после фильтрационного испытания наблюдаются открытые крупные поры, что говорит о постепенном расширении капиллярной пористости в процессе фильтрационного опыта. Микроструктура образца №2, прошедшего испытания, в сравнении с контрольным образцом, по-видимому, представляет собой объемный выход продуктов реакции выщелачивания, который характеризуется слипшимися частицами $CaCO_3$. Исследования выполнены с применением оборудования КТ и СЭМ геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова приобретенного в рамках реализации Программы развития Московского университета (СЭМ LEO 1450VP, Германия, КТ Yamato TDM 1000H-II, Япония).

Рост значения $K_ф$ в ходе опытной фильтрации от значений порядка 10^{-7} до$\cdot 10^{-4}$ м/сут может быть связан с растворением 12 % Ca в цементе. По-видимому, увеличение пористости в процессе фильтрационного опыта действительно связано с увеличением тонких капилляров цемента, заполняющего межзерновое пространство, что приводит к скачкообразному уменьшению фильтрационного сопротивления в момент возникновения гидравлической связи между капиллярами и крупными порами (размер которых по данным томографии изменяется незначительно).

Пример расчета растворения в образце

Расчетная оценка скорости растворения выполнена согласно простейшей модели равновесного растворения в потоке воды [Румынин, 2020], основанной на балансе концентраций твердой фазы и раствора в порах зоны полного растворения и за фронтом растворения, при поршневом вытеснении раствора, при этом растворимым соединением кальция при выщелачивании цементного камня принято наиболее растворимое соединение $Ca(OH)_2$. Результат расчета по такой модели позволяет оценить скорость растворения по величине равновесия на фронте растворения (Δn) равной отношению концентрации кальция в твердой фазе к концентрации кальция в растворе (аналогично составляющей эффективной пористости $n_э=n+\Delta n$). Так как скорость растворения образца к моменту возросшего расхода фильтрации известна, произведен обратный расчет баланса концентраций кальция в твердой фазе и растворе для оценки содержания кальция в твердой фазе в момент роста расхода фильтрации. Согласно модели [Румынин, 2020], для расчета скорости растворения необходимо рассчитать концентрацию ионов раствора в зоне, подвергшейся растворению из системы уравнений (5).

$$\begin{cases} C_{Ca} \cdot C_{OH}{}^2 = K_{ПР} \\ z_{Ca} \cdot C_{Ca} = z_{OH} \cdot C_{OH} + z_{Cl} \cdot C_{Cl} \end{cases} \quad (5)$$

Первое уравнение в системе (1) представляет равновесную концентрацию растворения, а второе – условие электронейтральности раствора, $K_{пр}$ – концентрационная константа равновесия диссоциации $Ca(OH)_2$, $K_{пр}= ПР/\gamma_{Ca}(\gamma_{OH})^2 = =10^{-5}/(0{,}9\cdot 0{,}98^2) \approx 1{,}16\cdot 10^{-5}$, C_{Cl} – концентрация хлора в растворе ($2{,}8\cdot 10^{-5}$ моль/л), z_{Ca}, z_{OH}, z_{Cl} – заряды ионов, равные 2, 1, 1. Таким образом: $C_{Ca}\cdot(C_{OH})^2 = 1{,}16\cdot 10^{-5}$ и $2\cdot C_{Ca} - C_{OH} = 2{,}8\cdot 10^{-5}$; $C_{Ca} \approx 0{,}014$ моль/л, $C_{OH} \approx 0{,}028$ моль/л.

В случае скачкообразного роста проницаемости образца из-за растворения на 37-е сутки (рисунок 8,9, таблица 1), средняя скорость растворения u составит 0,98/53280 ≈ $1{,}84\cdot10^{-5}$ см/мин, среднесуточная скорость фильтрации v в опыте при этом $5{,}2\cdot10^{-4}$ см/мин. Скорость растворения должна соответствовать действительной скорости перемещения кальция в поровом растворе, тогда согласно уравнению (6) [Шестаков, 2009]:

$$u = \frac{v}{n+\Delta n} \qquad (6)$$

где n – пористость, Δn – аналог коэффициента распределения, с учетом средней пористости образца n = 22 %, $\Delta n = (5{,}1\cdot10^{-4} / 1{,}84\cdot10^{-5}) - 0{,}22 \approx 27{,}5$. Так как $\Delta n = \Delta N/\Delta C$ изменение содержания кальция в твердом комплексе $\Delta N_{Ca} = 27{,}5\cdot0{,}014 \approx$ ≈ 0,385 моль/л или 15,43 г/л, что с объемом образца 0,95 $см^3$ соответствует изменению массы Ca в 0,015 г. Исходя из состава смеси цементного камня и массы образца в 1,54 г, исходное содержание кальция до фильтрации в форме CaO составляет 0,12 г. Общая потеря массы образца составляет 0,19 г. Таким образом, скачкообразный рост $K_ф$ может быть связан с растворением 12 % кальция в составе цемента.

Пример расчета растворения в барьере

Предлагается имитационный расчет выноса Ca из исследованного материала на основе бетона в качестве консервативного для сравнения устойчивости природных и искусственных слабопроницаемых материалов при скорости фильтрации в условиях инженерно-геологического массива (рисунок 11).

При известном из опыта вкладе растворения в изменение расхода и при изученном в ходе того же опыта коэффициенте фильтрации, при полуметровой толщине барьера и семиметровом перепаде напора на сторонах барьера, рост $K_ф$ из-за растворения возможен через длительное время: при известных из опыта (рисунок 8, таблица 1, формулы 5, 6) Δn и $K_ф$ имитационный расчет динамики выноса Ca из пористого материала, при его толщине Δl и перепаде давления (ΔH) на сторонах:

$u = K_ф \cdot (\Delta H) / \Delta l \cdot (n+\Delta n) = 5{,}3\cdot10^{-6}$ [м/сут] · 7 [м] / 0,5 [м] · (0,22+ 27,52) = $2{,}49\cdot10^{-6}$ [м/сут], или ≈ 540 лет.

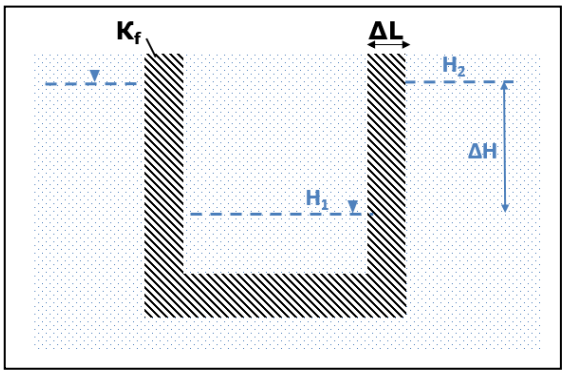


Рисунок 11. Фильтрационная схема к имитационному расчету динамики выноса Ca из пористого материала при его толщине ΔL, перепаде давления ΔH и известных из эксперимента Δn и $K_ф$

Figure 11. Filtration scheme for simulation calculation of Ca removal dynamics from porous material at its thickness ΔL, pressure drop ΔH and known from the experiment Δn and K_f

Пристеночная фильтрация. Эффект пристеночной фильтрации между стенками образца и ёмкости осложняет ход опыта, в котором весь расход фильтрации должен идти именно через образец. Согласно ГОСТ 12730.5–2018 (Бетоны. Методы определения водонепроницаемости)[18] для ликвидации пристеночной фильтрации используются различные герметизирующие мастики, которые должны полностью исключить фильтрацию между образцом и емкостью, однако зачастую не удается полностью исключить этот эффект, так как герметизирующий состав может иметь плохую адгезию к поверхности конкретного барьерного материала. Фильтрат может быть агрессивен к составу герметика, тем самым способствуя пристеночной фильтрации и осложняя интерпретацию при миграционных исследованиях в образцах. Таким образом, герметизирующий состав должен подбираться строго индивидуально для фильтрационных

[18] ГОСТ 12730.5-2018 «Бетоны. Методы определения водонепроницаемости»

испытаний на конкретном материале с фильтратом определенного состава. Отметим, что основной инструмент контроля отсутствия пристеночной фильтрации − начальная и периодическая визуальная проверка герметичности контрольного образца путем опрессовки воздухом под водой, что достигается конструкцией контрольной емкости с образцом, которая имеет открытый торец (рисунок 12).

Емкости для фильтрационных испытаний созданы самостоятельно и выполнены из полимерных материалов (полипропилен, фторопласт, оргстекло) (рисунок 12) для исключения коррозии на контакте с образцом и раствором, что имеет место при длительных испытаниях на стандартных фильтрационных приборах и о чем указано в статье [Царев, 2024]. Образец связного грунта может герметизироваться мастикой по стенкам, как указано на средней схеме, или по принципу работы камеры трехосного сжатия (или пермеаметра[19]), герметизируя пристеночное пространство образца давлением воды (рисунок 12), при этом все ёмкости выполняются из инертных материалов.

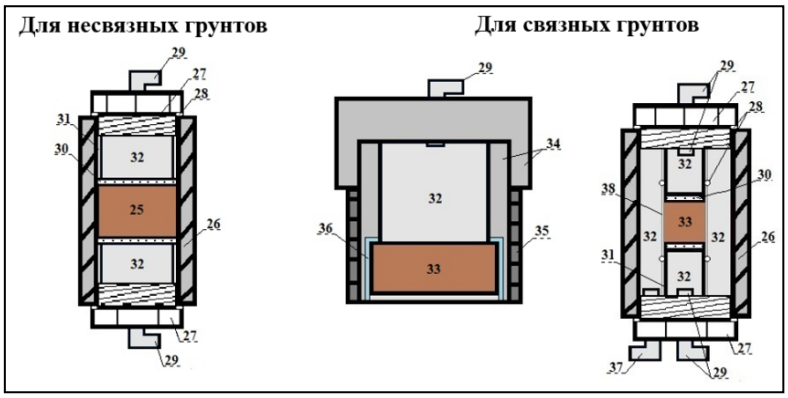


Рисунок 12. Полимерные ёмкости для размещения образцов: 25 – сыпучий материал заданной плотности; 26 – прозрачный корпус емкости для образца; 27 – резьбовая заглушка; 28 – уплотнительное кольцо; 29 – фитинг угловой с резьбой для фильтрационной трубки; 30 – твердый пористый фильтр; 31 – проставки ограничивающие высоту образца; 32 – жидкость; 33 – образец твердого материала; 34 – корпус емкости образца; 35 – стальная гильза; 36 – герметизирующая мастика; 37 – фитинг угловой с резьбой для создания бокового обжатия

Figure 12. Polymeric containers for placing samples: 25 – bulk material of specified density 26 – transparent body of the sample container; 27 – threaded plug; 28 – sealing ring; 29 – corner fitting with thread for filter tube; 30 – solid porous filter; 31 – spacers limiting the height of the sample; 32 -– liquid; 33 – sample of solid material; 34 – sample container body; 35 – steel sleeve; 36 – sealing mastic; 37 – angle fitting with thread for creating lateral compression

Эффект пристеночной фильтрации хотя и осложняет выполнение долговременных лабораторных опытов, но и сам по себе может быть использован для оценки качества применяемой гидроизоляции горных выработок с учетом состава барьерного материала, раствора, температуры, напора фильтрации.

Начальный градиент фильтрации (I_0). Для возникновения фильтрации через слабопроницаемый материал необходимо наличие гидрогеологических и гидрологических условий, при которых возможно превышение величины начального градиента напора I_0. Градиент напора в реальных гидрогеологических условиях редко превышает 60 и зависит от материала (грунта). По различным данным, значения I_0 изменяются для бетонов от 7 до 55 [Элбакидзе, 1988], и от 0 до 100 в опытах с глинами [Гольдберг, 1986], таким образом фильтрация в инженерно-геологическом массиве может возникнуть при градиентах порядка 5–10 и

[19] Standard Test Method for Measurement of Index Flux Through Saturated Geosynthetic Clay Liner Specimens Using a Flexible Wall Permeameter. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959. United States.

в этом случае значение I_0 может быть учтено для барьерного материала.

Описание и изучение фильтрации при низких градиентах выполнялось различными авторами [Гольдберг, 1986; Элбакидзе, 1988; Шестаков, 2008; Павилонский, 1968; Dixon, 1999]. Существование I_0 объясняется в литературе [Шестаков, 2008] молекулярным взаимодействием воды и породы с основным законом фильтрации в виде (7).

$$V = K\text{ф} \cdot \left[I - \frac{4}{3} \cdot I_0 - \frac{I_0}{3}\left(\frac{I_0}{I}\right)^3 \right] \qquad (7)$$

$K\phi$ − коэффициент фильтрации [м/сут]; V – скорость фильтрации [м/сут]; I – градиент фильтрации [$м_{вод.ст.}$/м]; I_o – начальный градиент фильтрации [$м_{вод.ст.}$/м].

Скорость фильтрации через образец глиноземистого цементного камня (рисунок 7) исследовалась при снижении градиента фильтрации [Царев, 2023а] до полной остановки фильтрации, зафиксировано значение I_0 =108. Тем же способом исследовался и неуплотненный бентонитовый порошок [Царев, 2023а], с той разницей что значение I_0 = 38 бентонитового поршка оценено только по теоретической формуле 7 и не подтверждено экспериментально остановкой фильтрации, так как бентонитовая глина имела $К_ф$ порядка 10^{-7} м/сут, что на три порядка меньше, чем для образца глиноземистого цементного камня (таблица 1). Таким образом, экспериментально подтвержденная остановка фильтрации с высоким значением I_0 для образца цементного камня говорит о вероятном протекании в образце процессов отличных от физического процесса сдерживания воды межмолекулярными силами взаимодействия воды и породы, предположительно кольматации порового пространства твердыми частицами слаборастворимых минералов в процессе фильтрационного опыта.

Рассчитанное по экспериментальным данным значение I_0 = 38 для бентонитовой глины превышает теоретические, подсчитанные в [Шестаков, 2008] значения I_0 для глинистых грунтов (составляющие около единицы), при этом в [Шестаков, 2008] в качестве параметров от которых зависит величина I_0 рассматриваются: плотность и вязкость жидкости, начальное напряжение сдвига, пористость и коэффициент фильтрации. В работе [Павилонский, 1968] произведена сравнительная оценка величин I_0 полученных расчетным и экспериментальным способом, в качестве параметров от которых зависит I_0 дополнительно рассматриваются количество связанной воды и удельная поверхность грунта. Таким образом, значения I_0 для глинистых грунтов с большим содержанием набухающих минералов (такие как бентонитовая глина) могут превышать указанные в [Шестаков, 2008], однако без экспериментального подтверждения с полной остановкой фильтрации эти значения не следует принимать за действительные, к тому же как отмечалось в работе [Павилонский, 1968] экстраполяция по графику $V(I)$ может дать ошибочный результат. По мнению авторов работы [Павилонский, 1968], экспериментальные величины I_0 незначительны (не превышают единицы), поэтому при сооружении барьеров предлагается не принимать их в расчет; при этом отмечена сложность фильтрации в глинистых грунтах, которую не учитывают теоретические формулы для определения значения I_0 основанные на замене реального грунта фиктивным (системе капиллярных трубок одинакового диаметра).

Вероятной причиной регистрации значений I_0 разными исследователями [Гольдберг, 1986; Элбакидзе, 1988] могла стать и низкая точность регистрации расхода фильтрации. В дальнейшем нами запланированы эксперименты с изучением скорости перераспределения порового давления в образцах слабопроницаемых материалов, что может дать возможность оценить влияние водоотдачи в нестационарный период и характер нелинейности $V(I)$. Учитывая неоднозначность выводов разных исследователей о проявлении начального градиента фильтрации и сложность фильтрационных процессов при этом, с нашей точки зрения, практический вопрос полезно ограничить оценкой значения расхода фильтрации через образцы барьерных материалов именно для гидрогеологических условий объекта.

Выводы

Физико-химические изменения, влияющие на структуру и свойства слабопроницаемых

барьерных материалов, являются сложными; влияние условий и воздействий на проницаемость и миграционные свойства барьеров на период долгосрочного применения ИИБ при различных инженерно-геологических условиях требуют учета. Степень химической деградации может изучаться с точки зрения изменения водопроницаемости, которая рассматривается авторами как один из важнейших показателей общей деградации материала в ходе эволюции системы захоронения РАО.

Предлагаемый в настоящей работе подход применим для консервативной оценки фильтрационной устойчивости барьерных материалов и включает в себя: длительный фильтрационный опыт через образцы при постоянном давлении воды; оценку K_ϕ и I_o образца материала, исследование химического состава вытяжки раствора в исходном образце и после выщелачивания фильтратом порового пространства образца в ходе фильтрации; экспериментальную оценку времени до изменения фильтрационных свойств образца в результате растворения; изучение изменения в структуре образцов методами КТ и СЭМ; имитационную расчетную оценку изменения массы вещества влияющего на пористость и фильтрационной устойчивости материала при заданной его толщине от растворения при реальной скорости фильтрации. Результаты работ предшественников [Jacques, 2013] на наш взгляд продемонстрировали, что решение уравнений в универсальных симуляторах (таких как COMSOL Multiphysics и др.) позволяет в значительной степени упростить реализацию расчетов. Методы КТ и СЭМ позволяют выполнить оценку изменения структуры порового пространства, морфологии пор барьерных материалов для контроля результатов испытаний, моделирующих сценарии эволюции системы захоронения РАО.

Деградация противофильтрационных свойств испытанного образца бетона проявляется скачкообразно (из-за выноса Ca). Для различных материалов необходимо индивидуальное изучение кинетики деградации противофильтрационных свойств. В большинстве природных условий приповерхностного захоронения на начальных этапах фильтрация через поровое пространство исследованного материала будет минимальной. Вследствие низкой проницаемости или отсутствовать при кольматации пор. Таким образом, при создании барьера из исследованного цементного камня необходим учет времени водонасыщения за счет капиллярного увлажнения и учет малых скоростей выноса.

Для материалов инженерных барьеров безопасности, состав которых подбирается экспериментально с использованием различных минералов и добавок [Лотов, 2015; Райтбурд, 1968; Семенов, 2009; Толыпина, 2016], должны учитываться процессы изменения минеральных веществ (растворение и замещение и др.), ведущие к изменению плотности, пористости и проницаемости [Гольдберг, 1986; Элбакидзе, 1988], что дополняет существующие подходы[20,21,22]. На наш взгляд, проведение длительных фильтрационных испытаний целесообразно, так как изолирующие свойства применяемых барьеров должны сохраняться в течении всего срока службы барьера, для исключения утечек из сооружения и снижения несущей способности при хранении и захоронении РАО, а также для обоснования долгосрочных гидрогеологических прогнозов в части эволюции фильтрационных и миграционных свойств барьерных материалов. Предлагаемый подход и оборудование могут быть применены при изучении эволюции барьерных материалов, подтверждения срока их службы и обоснования интенсивности выхода токсичных веществ и радионуклидов за пределы барьеров. Помимо ППЗРО, объекты, на которых ведется проектирование и сооружение барьеров для защиты от загрязнения, представлены на территории России и других стран полигонами бытовых отходов, а также отходов горнорудного и химического производства.

Для исследования зависимости *V(I)* в слабопроницаемых грунтах и барьерных

[20] ГОСТ 22733-2016 «Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности».
[21] ГОСТ 12730.5-2018 «Бетоны. Методы определения водонепроницаемости».
[22] ГОСТ 25584-2016 «Грунты. Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации».

материалах, необходима высокая точность измерения расхода фильтрации, достижение стабилизации скорости фильтрации на каждой ступени градиента. Отметим, что нелинейность *V(I)* может быть обусловлена деформацией порового пространства или его кольматацией. Получение таких данных связано с временными ограничениями и возможно только с помощью высокоточных лабораторных весов и расходомеров, что существенно облегчается автоматической записью расхода и параллельным испытанием большого количества образцов для разных условий.

1. Рекомендуется дополнить действующие федеральные нормы и правила, регламентирующие учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии[23], определением «внешнее воздействие» – воздействием, которое вызвано внешними по отношению к ОИАЭ процессами, явлениями и факторами техногенного или природного происхождения. Таким образом, долговременное изменение свойств барьеров безопасности должно рассматриваться в зависимости от гидрогеологических и инженерно-геологических условий ППЗРО, входящих в определение «внешние воздействия».

2. В выполненной работе продемонстрировано, что изменение фильтрационных свойств может служить показателем деградации материала, что указывает на необходимость оценки изменения фильтрационных свойств барьерных материалов с учетом прогнозируемых внутренних и внешних воздействий на долгосрочный период эксплуатации ИББ.

3. Методический подход, приведенный в работе, может позволить развить и детализировать требования нормативной документации различного уровня[23,24,25,26] в части:

– необходимости оценки гидравлической проницаемости Кф и сорбционной способности по отношению к радионуклидам Кд не только для буферных материалов, но и для всех барьеров безопасности, включая бетон строительных конструкций, подстилающий и покрывающий экраны;

– необходимости учета времени изменения этих характеристик в период потенциальной опасности захороненных РАО с учетом опытных данных (гидрогеологический и геотехнический мониторинг ближней зоны или лабораторные оценки изменения сорбционных и фильтрационных свойств);

– установления (определения) для каждого из ИББ параметров и характеристик, с учетом их изменения во времени;

– формирования сводной таблицы, содержащей учитываемые внешние процессы и их параметры для каждого из ИББ;

– учета в перечне внешних воздействий гидрогеологических, инженерно-геологических и геокриологических условий, влияющих на изменение свойств ИББ.

Благодарность

Авторы выражают благодарность Алексею Владимировичу Родину за выполнение исследований с применением масс-спектрометра ICP-MS (ФБУ «НТЦ ЯРБ»), старшему научному сотруднику НИИ строительных материалов и технологий Медведеву Вячеславу Викторовичу за выполнение исследований с применением термогравиметрического анализа и анализа ДТА и специалистам: Расторгуеву Александру Владиленовичу, Куваеву Андрею Алексеевичу, Анисимову Николаю Александровичу и Сорокину Валерию Трофимовичу за отдельные

[23] НП-064-17 (Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии) не содержат определения «внешних воздействий»

[24] НП-069-14. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Приповерхностное захоронение радиоактивных отходов. Требования безопасности».

[25] НП-055-14. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности»

[26] РБ-117-16. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии «Оценка долговременной безопасности пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов»

ценные замечания, оказавшие значительную роль при подготовке статьи.

Acknowledgments

The authors would like to thank Alexey Vladimirovich Rodin for performing the studies using ICP-MS mass spectrometer (Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety), Medvedev Vyacheslav Viktorovich, senior researcher at the Research Institute of Construction Materials and Technologies, for performing the studies using thermogravimetric analysis and DTA analysis, and specialists: Rastorguev Alexander Vladilenovich, Kuvaev Andrey Alekseevich, Anisimov Nikolay Aleksandrovich and Sorokin Valeriy Trofimovich for some valuable comments that played a significant role in the preparation of the article.

Литература

Анисимов Н. А., Куваев А. А. Численное моделирование влагопереноса в конструкциях приповерхностного пункта захоронения радиоактивных отходов // Радиоактивные отходы. 2022. № 3 (20). С. 97–106. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-3-97-106.

Воронков М.Е. Взаимодействия кремнеземсодержащих добавок в цементных композициях в условиях щелочного расширения. Диссертация на соискание ученой степени кандидата наук. Санкт-Петербург, 2013, 117 с.

Гольдберг В. М., Скворцов Н. П. Проницаемость и фильтрация в глинах. М.: Изд-во Недра, 1986. 160 с.

Иванов И.А., Шатков Е.М., Сорокин В.Т., Гулин А.Н. Диффузия радионуклидов в цементосодержащих материалах // Радиохимия. 1994. Т. 36, вып. 2.

Игин И. М., Минин А. В., Бамборин М. Ю., Кузьмин Е. В., Трофимова Ю. В. Определение прогнозных сроков долговременной безопасности пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов при различных сценариях их эксплуатации // Радиоактивные отходы. 2022. № 3 (20). С. 50–60. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-3-50-60.

Лаверов Н.П., Величкин В.И., Омельяненко Б.И., Юдинцев С.В., Петров В.А., Бычков А.В. Т. 5: Изоляция отработавших ядерных материалов: геолого-геохимические основы. — М.: ИГЕМ РАН; ИФЗ РАН, 2008. 280 с.

Лотов В. А. Применение модифицированного жидкостекольного вяжущего в производстве строительных материалов // Строительные материалы. 2015. №1. С. 72–75.

References

Ageing management of concrete structures in nuclear power plants. International Atomic Energy Agency. Series: IAEA nuclear energy series, ISSN 1995–7807. 2016, no. NP-T-3.5.

Anisimov N. A., Kuvaev A. A. Chislennoe modelirovanie vlagoperenosa v konstrukciyah pripoverhnostnogo punkta zahoroneniya radioaktivnyh othodov [Numerical modeling of moisture transfer in structures of a near-surface radioactive waste disposal facility]. *Radioaktivnye othody [Radioactive Waste]*, 2022, no. 3 (20), pp. 97–106. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-3-97-106.

Dixon D.A., Graham J., Gray M.N. Hydraulic conductivity of clays in confined tests under low hydraulic gradients. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36 (5), pp 815–825. DOI:10.1139/t99-057.

Dron R., Privot F. Thermodynamic and kineic approach to the alkali-silica reaction: Part I. Concepts. Cement Concrete Re, 1992, vol. 22, pp. 941–948.

Elbakidze M. G. Fil'traciya vody cherez beton i betonnye gidrotekhnicheskie sooruzheniya: uchebnoe posobie. Biblioteka gidrotekhnika i gidroenergetika. [Water filtration through concrete and concrete hydraulic structures: a tutorial. Library of hydraulic engineering and hydropower.]. M, Energoatomizdat Publ., 1988, 104 p.

Goldberg V. M., Skvortsov N. P. Pronicaemost' i fil'traciya v glinah [Permeability and filtration in clays]. M: Nedra Publ., 1986, 160 p.

Igin I. M., Minin A. V., Bamborin M. Yu., Kuz'min E. V., Trofimova Yu. V. Opredelenie prognoznyh srokov dolgovremennoj bezopasnosti punktov pripoverhnostnogo zahoroneniya radioaktivnyh othodov pri razlichnyh scenariyah ih ekspluatacii. Radioaktivnye othody [Determination of the predicted long-term safety periods of a near-surface disposal site for radioactive waste under various operating conditions]. *Radioactive Waste*, 2022, № 3

Павилонский В.М. К вопросу о начальном градиенте напора в глинистых грунтах // Труды института ВОДГЕО, выпуск 19. 1968. с. 78–85.

Райтбурд Ц. М., Слонимская М. В. Кристаллохимия поверхности глинистых минералов и микроструктура глин. Физические и химические процессы и фракции. М.: Наука, 1968. 41 с.

Румынин В.Г. Теория и методы изучения загрязнения подземных вод. Санкт-Петербург: Наука, 2020. 144 с.

Семенов В. Б., Клюев А. Н. Щелочно-силикатный бетон с добавкой целлюлозы // Гидротехническое строительство. 2009. № 4. С. 59–61.

Сорокин В. Т., Гатауллин Р. М., Свиридов Н. В., Павлов Д. И. Долговечность железобетонных контейнеров типа НЗК-150-1,5П при захоронении радиоактивных отходов 2 класса // Радиоактивные отходы. 2022. № 3 (20). С. 37–49. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-3-37-49.

Толыпина Н. М. Физико-химические основы повышения коррозионной стойкости цементных систем путем оптимизации вещественного состава. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Белгород, 2016. 393 с.

Царев М. А., Лободенко И. Ю. Методы оценки коэффициента фильтрации слабопроницаемых материалов, учет воздействий на проницаемость. Фундаменты. — М.: Изд-во «Международная ассоциация фундаментостроителей IAFC». ISSN: 2713-3354. 2024. №1. С. 44–48.

Царев М. А. Экспериментальная оценка устойчивости фильтрационных параметров искусственных грунтов. — М.: Материалы XVIII общероссийской научно-практической конференции и выставки «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации». 2023a. 269 с.

Царев М. А., Лободенко И. Ю. Экспериментальная оценка противофильтрационных свойств пористых материалов для долговременной защиты зданий и сооружений. — Сочи, 9–13 октября. Сборник тезисов докладов XV Российской Национальной Конференции по сейсмостойкому строительству и сейсмическому районированию (с международным участием). 2023b. С. 172–178.

(20), pp. 50−60. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-3-50-60.

Ivanov I.A., E.M. Shatkov, Sorokin V.T., Gulin A.N. Diffuziya radionuklidov v cementosoderzhashchih materialah [Diffusion of radionuclides in cement-containing materials]. *Radiohimiya [Radiochemistry]*, 1994, vol. 36, iss. 2.

Jacques D., Perko J., Seetharam S., Mallants D., Govaerts J.. IAEA, 2013, pp.26. DOI:10.13140/RG.2.2.15374.77129.

Laverov N.P., Velichkin V.I., Omel'yanenko B.I., YUdincev S.V., Petrov V.A., Bychkov A.V. T. 5: *Izolyaciya otrabotavshih yadernyh materialov: geologo-geohimicheskie osnovy [Isolation of spent nuclear materials: geological and geochemical principles]*. M: IGEM RAN; IFZ RAN Publishing House, 2008, 280 p.

Lotov V. A. Primenenie modificirovannogo zhidkostekol'nogo vyazhushchego v proizvodstve stroitel'nyh materialov [Application of modified liquid glass binder in the production of building materials]. Stroitel'nye materialy [Building materials], 2015, no.1, pp. 72–75.

Medvedev V., Pustovgar A., Adamtsevich A., Adamtsevich L. Concrete Carbonation of Deep Burial Storage Constructions under Model Aging Conditions. Buildings, 2024, 14, 8.

Pavilonskij V.M. K voprosu o nachal'nom gradiente napora v glinistyh gruntah [On the issue of the initial pressure gradient in clay soils]. *Trudy instituta VODGEO [Proceedings of the VODGEO Institute],* 1968, no. 19, pp. 78–85.

Rajtburd C. M., Slonimskaya M. V. *Kristallohimiya poverhnosti glinistyh mineralov i mikrostruktura glin. Fizicheskie i himicheskie processy i frakcii. [Crystal chemistry of clay mineral surfaces and microstructure of clays. Physical and chemical processes and fractions]*. M: Nauka Publ., 1968, 41 p.

Rumynin V.G. *Teoriya i metody izucheniya zagryazneniya podzemnyh vod [Theory and methods of studying groundwater pollution]*. Saint-Petersburg. Nauka Publ., 2020, 144 p.

Semenov V. B., Klyuev A. N. SHCHelochno-silikatnyj beton s dobavkoj cellyulozy [Alkali-silicate concrete with cellulose additive]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo [Hydraulic engineering]*, 2009, vol. 4, pp. 59–61.

Царев М. А., Лободенко И. Ю., Понизов А. В., Родин А. В. Экспериментальная оценка изменения фильтрационных свойств геохимического барьерного материала на основе бетона при растворении. — Томск. Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: труды V всероссийской научной конференции с международным участием им. проф. С. Л. Шварцева. 2023с. С. 95–100.

Царев М. А. Результаты использования экспериментального фильтрационного комплекса с автоматизированной системой сбора информации для оценки коэффициента фильтрации слабопроницаемых материалов. — М.: Материалы XVII общероссийской научно-практической конференции и выставки «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации». 2022. 442 с.

Шестаков В. М. Гидрогеодинамика. М.: Изд-во «КДУ», 2009. С. 37–41.

Элбакидзе М. Г. Фильтрация воды через бетон и бетонные гидротехнические сооружения: учебное пособие. Библиотека гидротехника и гидроэнергетика. М.: Изд-во «Энергоатомиздат», 1988. 104 с.

Ageing management of concrete structures in nuclear power plants // International Atomic Energy Agency. Series: IAEA nuclear energy series, ISSN 1995–7807. 2016. no. NP-T-3.5

Dixon D.A., Graham J., Gray M.N. Hydraulic conductivity of clays in confined tests under low hydraulic gradients // Canadian Geotechnical Journal. 1999. 36 (5). P 815–825. DOI:10.1139/t99-057.

Dron R., Privot F. Thermodynamic and kineic approach to the alkali-silica reaction: Part I. Concepts // Cement Concrete Res. 1992. Vol. 22. P. 941–948.

Jacques D., Perko J., Seetharam S., Mallants D., Govaerts J. Modelling long-term evolution of cementitious materials used in waste disposal // Behaviours of Cementitious Materials in Long Term Storage and Disposal. Publisher: IAEA. 2013. P.26. DOI:10.13140/RG.2.2.15374.77129.

Medvedev V., Pustovgar A., Adamtsevich A., Adamtsevich L. Concrete Carbonation of Deep Burial Storage Constructions under Model Aging Conditions // Buildings. 2024. Vol. 14. 8. DOI:10.3390/buildings14010008.

Shestakov V. M. *Gidrogeodinamika [Hydrogeo-dynamics]*. M., KDU Publ., 2009, pp. 37–41.

Sorokin V. T., Gataullin R. M., Sviridov N. V., Pavlov D. I. Dolgovechnost' zhelezobetonnyh kontejnerov tipa NZK-150-1,5P pri zahoronenii radioaktivnyh othodov 2 klassa [Durability of reinforced concrete containers of the NZK-150-1.5P type for the disposal of class 2 radioactive waste]. *Radioaktivnye othody [Radioactive Waste],* 2022, № 3 (20), pp. 37–49. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-3-37-49.

Tsarev M. A., Lobodenko I. Yu. Metody ocenki koefficienta fil'tracii slabopronicaemyh materialov, uchet vozdejstvij na pronicaemost' [Methods for assessing the filtration coefficient of low-permeability materials, taking into account the impact on permeability]. *Fundamenty [Foundations]*. Moscow, Publ. International Association of Foundation Builders IAFC, 2024, №1, pp. 44–48.

Tsarev M. A. Eksperimental'naya ocenka ustojchivosti fil'tracionnyh parametrov iskusstvennyh gruntov [Experimental assessment of the stability of filtration parameters of artificial soils]. *Materialy XVIII obshcherossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii «Perspektivy razvitiya inzhenernyh izyskanij v stroitel'stve v Rossijskoj Federacii» [Proceedings of the XVIII All-Russian scientific and practical conf. "Prospects for the development of engineering surveys in construction in the Russian Federation"],* Moscow, 2023a, 269 p. (in Russian)

Tsarev M. A., Lobodenko I. Yu. Eksperimental'naya ocenka protivofil'tracionnyh svojstv poristyh materialov dlya dolgovremennoj zashchity zdanij i sooruzhenij *[Experimental assessment of anti-filtration properties of porous materials for long-term protection of buildings and structures]. Sbornik tezisov dokladov XV Rossijskoj Nacional'noj Konf. po sejsmostojkomu stroitel'stvu i sejsmicheskomu rajonirovaniyu (s mezhdunarodnym uchastiem) [Collection of abstracts of reports of the XV Russian National Conf. on Earthquake-resistant construction and seismic zoning].* Sochi, October 9–13, 2023b, pp. 172–178. (in Russian)

Tsarev M. A., Lobodenko I. Yu., Ponizov A. V., Rodin A. V. Eksperimental'naya ocenka izmeneniya fil'tracionnyh svojstv geohimicheskogo bar'ernogo materiala na osnove betona pri rastvorenii [Experimental assessment of changes in the filtration properties of a geochemical barrier material based on concrete during dissolution]. *Geologicheskaya evolyuciya vzaimodejstviya vody s gornymi porodami: trudy V vserossijskoj nauchnoj konf. im.*

prof. S. L. Shvarceva [Geological evolution of the interaction of water with rocks: Proceedings of the V All-Russian scientific conf. named after prof. S. L. Shvartsev], Tomsk, 2023c, pp. 95−100. (in Russian)

Tsarev M. A. Rezul'taty ispol'zovaniya eksperimental'nogo fil'tracionnogo kompleksa s avtomatizirovannoj sistemoj sbora informacii dlya ocenki koefficienta fil'tracii slabopronicaemyh materialov [Results of using an experimental filtration complex with an automated data collection system to assess the filtration coefficient of low-permeability materials]. *Materialy XVII obshcherossijskoj nauchno-prakticheskoj konf. i vyst. «Perspektivy razvitiya inzhenernyh izyskanij v stroitel'stve v Rossijskoj Federacii» [Proceedings of the XVII All-Russian scientific and practical conf. and exh."Prospects for the development of engineering surveys in construction in the Russian Federation]*, M., 2022, 442 p. (in Russian)

Tolypina N. M. *Fiziko-himicheskie osnovy povysheniya korrozionnoj stojkosti cementnyh sistem putem optimizacii veshchestvennogo sostava.* Diss. soisk. uch. st. dokt. tekh. n. *[Physicochemical bases for increasing corrosion resistance of cement systems by optimizing the material composition. D. (Technical sciences) Thesis]*, Belgorod, 2016, 393 p.

Voronkov M.E. *Vzaimodejstviya kremnezemsoderzhashchih dobavok v cementnyh kompoziciyah v usloviyah shchelochnogo rasshireniya. Dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata nauk [Interactions of silica-containing additives in cement compositions under alkaline expansion conditions. Ph. D. Thesis]*, Saint-Petersburg, 2013, 117 p.

МЕТОДЫ, МОДЕЛИ И ТЕХНОЛОГИИ
METHODS, MODELS AND TECHNOLOGIES

УДК 630.3; 624.131.43 DOI: 10.34753/HS.2024.6.1.76

РАЗРАБОТКА СТЕНДА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТРЕБНОЙ ТОЛЩИНЫ МНОГОСЛОЙНЫХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД ЛЕСНЫХ ДОРОГ

А.Р. Бирман, О.В. Зубова, С.А. Угрюмов
ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова»,
г. Санкт-Петербург, Россия
Ok_z19@mail.ru

Аннотация. Основными механическими характеристиками, определяющими эксплуатационные показатели лесной дороги, являются модуль деформации, характеризующий жесткость грунта в основании и его сопротивляемость деформации, а также модуль упругости, характеризующий как деформационные, так и прочностные свойства грунтов. Одним из главных параметров, определяющих величины указанных модулей, является величина деформации грунта, передаваемая через толщу дорожной одежды. Применяемые в настоящее время методики расчета нежестких дорожных одежд, как аналитические, так и экспериментальные, являются достаточно сложными и не обладают должной достоверностью. Особенно высока погрешность при конструировании многослойных дорожных одежд (три слоя и более). Авторами предлагается конструкция стенда для наблюдения упругих и остаточных деформаций при динамическим нагружении многослойных дорожных конструкций с возможностью определения потребной толщины каждого слоя экспериментальным путем так, чтобы на грунт земляного полотна передавался только равномерно распределенный вес вышележащих слоев. Предлагаемый стенд позволяет визуально определять величины деформации (осадки) каждого слоя под нагрузкой

DESIGNING OF A STAND FOR DETERMINING THE REQUIRED THICKNESS OF MULTILAYER ROAD COVERINGS OF FOREST ROADS

Alexey R. Birman, Oksana V. Zubova, Sergey A. Ugryumov
Saint Petersburg State Forest Technical University, St. Petersburg, Russia
Ok_z19@mail.ru

Abstract. The main mechanical characteristics that determine the operational performance of forest road are the modulus of deformation, which characterizes the stiffness of the soil at the base and its resistance to deformation, as well as the modulus of elasticity, which characterizes both the deformation and the strength of the soil. One of the main parameters determining the values of these modules is the amount of soil deformation transmitted through the thickness of the pavement. Currently used methods for calculating non-rigid road structures, both analytical and experimental, are quite complex and do not have the required reliability. The error is especially high when designing multilayer road structures (three layers or more). The authors propose a stand design for observing elastic and residual deformations under dynamic loading of multilayer road structures with the possibility of determining the required thickness of each layer experimentally so that only the evenly distributed weight of the upper layers is transmitted to the ground of the roadbed. The proposed stand allows for the visual determination the values of deformation (precipitation) of each layer under load and after removing the load, as well as experimentally determine the real values of the deformation modules of both each layer of the road structure and the underlying soil of the roadbed. The stand makes it possible to determine the discrete degree of deformation of each layer of the road structure and the underlying soil. That allows, based

Birman A.R., Zubova O.V., Ugryumov S.A. Designing of a stand for determining the required thickness of multilayer road coverings of forest roads. *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2024, vol. 6, iss. 1, pp. 76–82. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2024.6.1.76.

и после снятия нагрузки, а также экспериментально определять реальные величины модулей деформации как каждого слоя дорожной одежды, так и подстилающего грунта земляного полотна. Стенд дает возможность определения дискретной величины осадки каждого слоя дорожной одежды и подстилающего грунта, что позволяет по результатам испытаний оценить эффективность сопротивления деформациям в каждом слое и варьировать толщины и виды материалов каждого слоя таким образом, чтобы каждый из них обеспечивал наибольшее сопротивление внешней нагрузке. С использованием стенда можно проводить теоретические исследования по взаимодействию различных материалов в толще дорожной одежды, возможностям их восстановления при снятии нагрузки, распределению деформаций за пределами отпечатка колеса. Применение данного стенда расширяет потенциал для изучения конструкций лесных дорог, что позволяет экономить дорожно-строительные материалы и повысить эффективность строительства лесных дорог.

Ключевые слова: лесные дороги; многослойная дорожная одежда; модуль общей деформации; стенд для определения потребной толщины дорожной одежды.

on the test results, to evaluate the effectiveness of deformation resistance in each layer and vary the thicknesses and types of materials of each layer so that each of them provides the greatest resistance to external load. Using the stand, theoretical studies can be carried out on the interaction of various materials in the composition of the road structure, the possibilities of their restoration when removing the load, and the distribution of deformations beyond the wheel imprint. The use of this stand expands the potential for studying the structures of forest roads, which allows to save road construction materials and to increase the efficiency of forest road construction.

Keywords: forest roads; multilayer road structure; general deformation module; stand for determining the required thickness of the road structure.

Введение

При проектировании дорожных одежд переходного типа, особенно актуальных на лесных и лесохозяйственных дорогах, необходимо добиваться таких условий, при которых величины механических характеристик подстилающих грунтов земляного полотна не превышают допустимых значений. Основными механическими характеристиками, определяющими эксплуатационные показатели лесной дороги, являются модуль деформации, характеризующий жесткость грунта в основании и его сопротивляемость деформации, а также модуль упругости, характеризующий как деформационные, так и прочностные свойства грунтов. Корректное определение этих величин позволяет при устройстве дорожной одежды наиболее полно использовать несущую способность подстилающего грунта, устанавливать рациональную и экономичную толщину дорожной одежды, а также обеспечивать устойчивость откосов земляного полотна [Ибрахим, 2016].

Одним из главных параметров, определяющих величины указанных модулей, является величина деформации грунта (осадки), передаваемая через толщу дорожной одежды. Нами полагается, что эти деформации должны сводиться к минимуму, а вид нагрузки, передаваемой на подстилающий грунт земляного полотна, должен быть максимально приближен к виду равномерно распределенной нагрузки, величина которой определяется только весом вышележащих слоев дорожной одежды.

Аналитические расчеты параметров выполнения такого условия достаточно сложны, так как физико-механические свойства многослойной дорожной одежды меняются в зависимости от вида используемого материала для каждого слоя одежды, его влажности, сил внутреннего трения и сцепления, других показателей. Известные эмпирические исследования, как лабораторные, так и полевые также трудоемки, а их результаты не отличаются требуемой точностью. Нормативные документы подразумевают испытание на вдавливание штампа только для полевых условий (ГОСТ 20276.1-2020[1]) Лабораторные испытания грунтов предусматривают испытания на одноосное сжатие (ГОСТ 12248.2-2020[2]) или компрессионное сжатие (ГОСТ 12248.3-2020[3]), которое согласно данным И.И. Черкасова [Черкасов, 1976] не отражает распределения нагрузки в стороны от штампа. При этом, согласно данным И.И. Черкасова остаточные деформации при вдавливании штампа и при компрессионном сжатии характеризуются совершенно различными кривыми. В работе [Виноградов, 2022] кроме того отмечается, что модуль деформации некорректно рассматривать в виде фиксированного значения, т.к. для сложных дисперсных грунтовых систем модуль деформации – это функция давления, к тому же нелинейная. Следует отметить, что все испытания по определению модуля общей деформации производятся для одного слоя однородного грунта, при этом существующие методики (например, ОДМ 218.5.007-2016[4]) учитывают наличие как упругих, так и остаточных деформаций. Однако восстановление упругих деформаций в нижних слоях дорожной одежды и в подстилающем грунте земляного полотна будет проходить не так, как при испытаниях в связи с тем, что восстановлению будет мешать вес вышележащих слоев. Таким образом многослойность конструкции накладывает дополнительные сложности на определение несущей способности оснований.

В работе [Ибрахим, 2016] предлагается в качестве одного из методов расчета моделирование дороги как композитного материала, что не учитывает неравномерности свойств слоев дорожной одежды, варьирования их толщины, неравномерности увлажнения, промерзания и т.д. Анализ методов определения упругих и остаточных деформаций, представленный [Ибрахим, 2016] также показывает, что все используемые в действующих документах методы расчета нежестких дорожных одежд являются приближенными, основанными на введении упрощающих положений и допущений, что может приводить как к занижению, так и к завышению толщины слоев дорожных одежд, в том и другом случае влекущем повышение экономических затрат.

По данным [Горский, 2021] в настоящее время происходит попытка перехода от традиционной и долгое время используемой упрощенной методики расчета нежестких дорожных одежд с приведением многослойных конструкций к двухслойным. При разработке ОДМ 218.3.1.005-2021[5] был проведен анализ как зарубежного опыта расчетов, так и исследования А.К. Приварникова и К.К. Туроверова, позволяющие выполнять расчеты для многослойных оснований. Авторами было выявлено значительное расхождение между расчетами толщины дорожной одежды по

[1] ГОСТ 20276.1-2020. Межгосударственный стандарт. Грунты. Метод испытания штампом [Электронный ресурс]. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200174754.

[2] ГОСТ 12248.2-2020. Межгосударственный стандарт Грунты. Определение характеристик прочности методом одноосного сжатия [Электронный ресурс]. URL: https://docs.cntd.ru/document/566409063.

[3] ГОСТ 12248.3-2020. Межгосударственный стандарт. Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости методом трехосного сжатия [Электронный ресурс]. URL: https://docs.cntd.ru/document/566409062.

[4] ОДМ 218.5.007-2016 Методические рекомендации по определению модуля упругости статическим штампом / Отраслевой дорожный методический документ [Электронный ресурс]. URL: https://docs.cntd.ru/document/456010072.

[5] ОДМ 218.3.1.005-2021 Проектирование нежестких дорожных одежд. Методические рекомендации по расчету параметров напряженно-деформированного состояния многослойных конструкций при воздействии колесных нагрузок [Электронный ресурс]. URL: https://docs.cntd.ru/document/573741138.

упрощенным методикам и по математическим моделям для многослойных полупространств. Погрешности составили до 99 %, а при различных углах внутреннего трения и более 100 %. Несмотря на то, что результаты данного исследования привели к разработке и внедрению новых нормативных документов, таких как ОДМ 218.3.1.005-2021[5] и ПНСТ 542-2021[6], не приведены экспериментальные подтверждения достоверности результатов расчетов по предлагаемым методикам, однако даже на теоретическом этапе закономерности распределения упругих и остаточных деформаций в многослойных конструкциях обоснованы не в полной мере.

В связи с многообразием и недостаточным обоснованием расчетов модуля общей деформации, а также его упругой и остаточной составляющих, авторам видится необходимость более глубокого изучения процессов, происходящих в многослойных дорожных одеждах под действием динамических нагрузок.

Материалы и методы

Для испытаний рассматриваются грунты различного гранулометрического состава, песок средней крупности, песчано-гравийные, щебеночно-песчаные смеси оптимального и неоптимального состава.

Испытания в разрабатываемом приборе предлагается выполнять, адаптируя методику ГОСТ 20276.1-2020 «Грунт. Метод испытания штампом»[1] к лабораторным условиям.

Результаты исследования

К использованию предлагается стенд для экспериментального определения потребной толщины многослойной дорожной одежды, выполненной, например, из трех слоев: покрытия из щебня, гравийно-песчаного основания, песчаного подстилающего слоя (рисунок 1).

Предлагаемый стенд позволит визуально определять величины деформации (осадки) каждого слоя под нагрузкой и после снятия нагрузки, а значит, и экспериментально определять реальные величины модулей деформации как каждого слоя дорожной одежды, так и подстилающего грунта земляного полотна. Визуальная оценка восстановления упругой деформации каждого слоя поможет сравнить фактическое значение упругости грунта и материала с учетом нагрузки от вышележащих слоев с табличными и расчетно-определяемыми величинами.

Схема предлагаемого стенда изображена на рисунке 1.

Стенд включает: рычажные весы (на рисунке 1 условно не показаны), на рабочем плече которых закреплен штамп (1) в виде пластины, выполненной из половины круга диаметром *D* и передающей усилие *F*; емкость (2) в виде вертикального стального корпуса, выполненного из трубы с внутренним диаметром *3D*, разрезанной по плоскости, проходящей через диаметры торцов трубы; образец (3). Емкость (2) имеет перфорированное дно (4) и снабжена вертикальной прозрачной пластиной (5), имеющей высоту емкости и жестко скрепленную с дном емкости и ее вертикальными кромками. Пластина (5) имеет вертикальную метрическую шкалу (6). На дне емкости (2) установлена металлическая сетка для защиты перфорированного дна от засорения (7).

Перед проведением экспериментов образец формируют из последовательно уложенных слоев дорожной одежды и подстилающего грунта земляного полотна. При этом материал среднего слоя трехслойной дорожной одежды и материал слоя подстилающего грунта предварительно окрашивают красителем, резко отличающимся по цвету от материала неокрашенных слоев. Толщины каждого слоя могут быть выбраны в соответствии с рекомендациями СП 288.1325800.2016[7].

Подготовка образца (3) перед его размещением в емкости заключается в его уплотнении на приборе стандартного уплотнения

[6] ПНСТ 542-2021 Дороги автомобильные общего пользования. Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования (с Поправками) / ПНСТ № 542-2021 [Электронный ресурс]. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200179561.

[7] СП 288.1325800.2016 «Дороги лесные. Правила проектирования и строительства» [Электронный ресурс]. URL: https://docs.cntd.ru/document/456069592.

при оптимальной влажности. Затем образец помещают в емкость (2) и ставят в эксикатор для капиллярного водонасыщения в соответствии с ГОСТ 30416-2020[8].

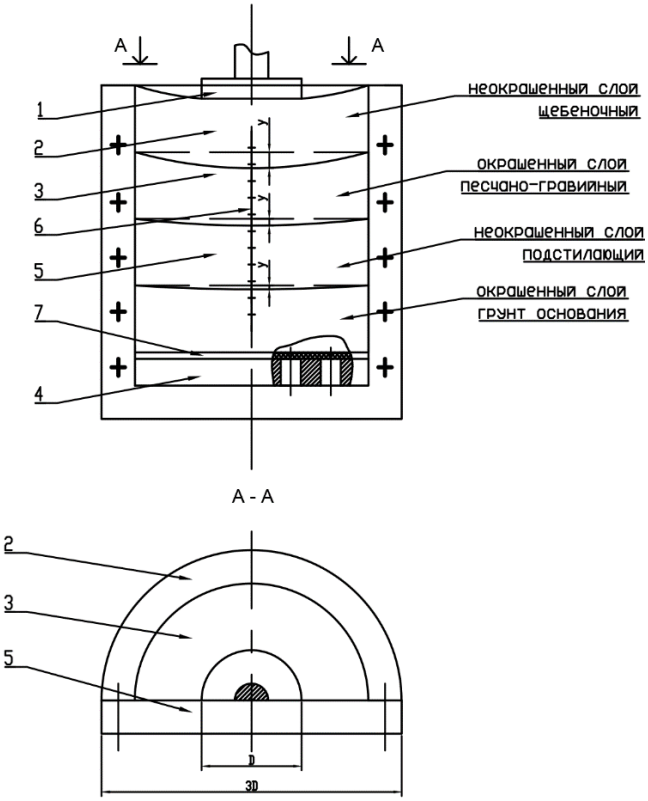


Рисунок 1. Схема стенда для экспериментального определения толщины слоев дорожной одежды. *1* – штамп для передачи вертикальных нагрузок, *2* – стальной корпус с внутренним диаметром *3D*, *3* – образец многослойной дорожной одежды, *4* – перфорированное дно корпуса, *5* – вертикальная прозрачная пластина, *6* – вертикальная метрическая шкала, *7* – металлическая сетка

Figure 1. The scheme of the stand for the experimental determination of the thickness of the layers of pavement. *1* – stamp for transmitting vertical loads, *2* – steel case with an internal diameter of 3D, *3* – sample of multilayer pavement, *4* – perforated bottom of the case, *5* – vertical transparent plate, *6* – vertical metric scale, *7* – metal mesh

Подготовленную емкость с образцом подвергают нагрузке через штамп, увеличивая нагрузку ступенями по 5–10 Н/см^2, начиная с 5 Н/см^2. Каждую ступень выдерживают до полного прекращения осадки штампа. Величину деформации каждого слоя $\boldsymbol{y}$ (см. рисунок 1) дорожной одежды и подстилающего грунта земляного полотна измеряют по показаниям на вертикальной метрической шкале (6).

При деформации слоев дорожной одежды частицы материала верхних слоев образца вдавливаются в частицы нижних слоев, и величины $\boldsymbol{y}$ и l_y для каждого слоя можно определять по показаниям вертикальной шкалы 6. При этом нижние границы разноокрашенных частиц каждого слоя показывают распределение вертикальной деформации материала под нагрузкой от минимальных до максимальных величин.

Наиболее значимая величина для расчетов по методу упругого прогиба – модуль общей деформации грунта $E_{деф}$ – это соотношение между сжимающим напряжением грунта и относительной полной деформацией, которую оно вызывает. Выражается показатель в МПа и определяется из расчета усадки и нагрузки на дорожное полотно по формуле

$$E_{\text{деф}} = \frac{\pi}{4} * \frac{\sigma * D * (1-\upsilon^2)}{l_{\text{общ}}} \qquad (1)$$

где D – расчетный диаметр отпечатка колеса, м;

σ – вертикальное давление на штамп, МПа;

$l_{\text{общ}}$ – полная осадка штампа, м;

υ – коэффициент Пуассона;

$\frac{\pi}{4}$ – поправочный коэффициент при испытании круглым жестким штампом.

Если задаваться допустимыми значениями $E_{деф}$, то искомой величиной в формуле (1) является $l_{общ}$, которую и важно определить при стендовых испытаниях.

Следует отметить, что в указанной расчетной формуле с применением штампа получают суммарную величину осадки штампа, как сумму деформаций всех слоев дорожной одежды, что, как было указано выше является существенным недостатком, приводящим к

[8] ГОСТ 30416-2020. Грунты. Лабораторные испытания. Общие положения [Электронный ресурс]. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200180503.

погрешностям расчета дорожных одежд и удорожанию конструкции. Предлагаемый стенд отличается тем, что дает возможность определения дискретной величины осадки каждого слоя дорожной одежды и подстилающего грунта, что позволяет по результатам испытаний давать оценку эффективности сопротивления деформациям в каждом слое и варьировать толщины и виды материалов каждого слоя таким образом, чтобы каждый из них обеспечивал наибольшее сопротивление внешней нагрузке.

То есть, переписав формулу (1) в виде

$$l_{\text{общ}} = \frac{\pi}{4} * \frac{\sigma * D * (1-\upsilon^2)}{[\text{Едеф}]} \qquad (2)$$

где $E_{деф}$ – допускаемое значение модуля общей деформации, на основании которого можно сделать заключение о работоспособности исследуемого дорожного покрытия и, при необходимости, менять толщины слоев или виды материалов для их формирования.

Пользуясь результатами измерения осадки каждого слоя дорожной одежды можно достаточно точно построить кривую осадки штампа в зависимости от явлений, происходящих в каждом слое дорожной одежды при силовом воздействии штампа.

Конфигурация пограничной кривой является важной информативной характеристикой, определяющей распределение напряжений (давлений) в каждом слое, а величина максимальной стрелы прогиба пограничной кривой позволяет определять модули деформации и упругости слоев образца внутри дорожной одежды, что дает возможность рационально выбрать толщины материалов, используемых для формирования дорожной одежды. Экспериментально полученная кривая изменения напряжений в слоях дорожной одежды может определить вид расчетной модели (Винклера, Фусса и т.д.), выбранной для аналитической оценки деформационных явлений в материалах дорожной одежды и подстилающих грунтов.

Следует отметить, что при испытаниях можно произвести замену плоского штампа на штамп с рабочей поверхностью, повторяющей контактную поверхность определенных колес лесовозного транспорта. В этом случае четко обозначатся деформированные границы слоев дорожной одежды, что позволит оценить направления распределения частиц материала слоя под воздействием колеса.

При заполнении емкости (2) только подготовленным к испытаниям конкретным материалом слоя дорожной одежды или подстилающего грунта можно определять модули деформации и упругости для исследуемого материала грунта.

Кроме вышерассмотренного примера исследования трехслойной дорожной одежды на стенде можно исследовать конструкцию покрытия из любого количества слоев, формируя исследуемый образец из чередующихся окрашенных и неокрашенных частиц материала каждого слоя.

Заключение

Предлагаемый стенд для определения потребной толщины многослойной дорожной одежды может быть применен не только для сугубо практических целей лесного дорожного строительства. Проведение серий экспериментов с различными комбинациями материалов и грунтов, а также варьирование условий (в том числе, изменение влажности и плотности слоев) может привнести существенный вклад в теоретические исследования механических свойств грунтов и дорожно-строительных материалов. Возможность непосредственного наблюдения за упругими и остаточными деформациями в многослойной дорожной одежде при динамических нагрузках позволит подтвердить или уточнить существующие расчетные методики определения модуля общей деформации и тем самым усовершенствовать методики расчета нежестких дорожных одежд.

Литература

Ибрахим Р.А. Анализ методов расчета деформаций нежестких дорожных одежд // Молодой ученый. 2016. № 30 (134). С. 75−83.

Черкасов И.И. Механические свойства грунтов в дорожном строительстве. М.: Транспорт, 1976. 247 с.

Виноградов А.Ю., Каширский В.И., Лободенко И.Ю., Зубова О.В., Виноградов И.А., Парфенов Е.А., Кучмин А.В., Обязов В.А., Платонов А.П. Модуль деформации как основная характеристика деформационной способности грунтов при проектировании сооружений лесного комплекса // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2022. Т. 4. Вып. 1. С. 52–67.

References

Ibrahim R.A. Analiz metodov rascheta deformacij nezhestkih dorozhnyh odezhd [Analysis of methods for calculating deformations of non-rigid road clothes] *Molodoj uchenyj,* 2016, vol 30 (134), pp. 75−83. (In Russian)

Cherkasov I.I. *Mekhanicheskie svojstva gruntov v dorozhnom stroitel'stve [Mechanical properties of soils in road construction].* M.: Transport, 1976, 247 p. (In Russian).

Vinogradov A.Yu., Kashirskij V.I., Lobodenko I.Yu., Zubova O.V., Vinogradov I.A., Parfenov E.A., Kuchmin A.V., Obyazov V.A., Platonov A.P. Modul' deformacii kak osnovnaya harakteristika deformacionnoj sposobnosti gruntov pri proektirovanii sooruzhenij lesnogo kompleksa [The modulus of deformation as the main characteristic of the deformation ability of soils in the design of structures of the forest complex] *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena,* 2022, vol. 4, iss. 1., pp. 52–67. (In Russian).

УДК 624.131.53
DOI: 10.34753/HS.2024.6.1.83

ОЦЕНКА ЗНАЧЕНИЙ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТА ПРИ НЕЛИНЕЙНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ЕГО СОПРОТИВЛЕНИЯ 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. При исследованиях транспортно-сдвигового селевого потока, размывов русел рек, устойчивости оползневых склонов, при проектировании зданий и сооружений, в том числе гидротехнических, важное значение имеет оценка параметров прочностных свойств грунтов – угла внутреннего трения φ и удельного сцепления c. Для определения этих параметров согласно требованиям всех основных регламентирующих документов необходимо использовать линейное уравнение Кулона $\tau = tg\varphi \cdot \sigma + c$, характеризующее зависимость между нормальным давлением на грунт σ и его сопротивлением сдвигу τ. Однако, как показывают многочисленные экспериментальные исследования, данная зависимость нелинейна, особенно в области малых давлений (< 0,1 Мпа), и может быть аппроксимирована степенной функцией вида $\tau_i = a(\sigma_i)^b$. В случае использования линейной зависимости между сопротивлением сдвига и нормальным давлением, угол внутреннего трения φ и удельное сцепление c определяются просто и при любой нагрузке являются константами. В случае использования степенной зависимости возникают затруднения с их оценкой. В целях соответствия аппроксимации результатов исследования грунтов на сдвиг нелинейной функцией существующей нормативной базе, предполагаем,

ESTIMATION OF THE VALUES OF THE STRENGTH CHARACTERISTICS OF THE SOIL WITH A NONLINEAR DEPENDENCE OF ITS SHEAR RESISTANCE ON NORMAL PRESSURE

Alexey Yu. Vinogradov[1,2], Victor 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. When studying the transport-shear mudflow, riverbed washouts, the stability of landslide slopes, when designing buildings and structures, including hydraulic engineering, it is important to assess the parameters of the strength properties of soils. To determine these parameters according to the requirements of all the main regulatory documents, it is necessary to use the linear Coulomb equation $\tau = tg\varphi \cdot \sigma + c$, characterizing the relationship between the normal pressure on the soil σ and its shear resistance τ. However, as numerous experimental studies show, this dependence is nonlinear, especially in the region of low pressures (< 0.1 MPa), and can be approximated by a power function of the form $\tau_i = a(\sigma_i)^b$. In the case of using a linear relationship between shear resistance and normal pressure, the angle of internal friction φ and the specific soil adhesion c are simply determined and are constants under any load. In the case of using a power dependence, difficulties arise with their assessment. In order to match the approximation of the results of the soil shear study by a nonlinear function to the existing regulatory framework, we assume that the state of the soil at a given normal pressure σ_0 is sufficiently described by the tangent equation at points with a certain normal pressure σ_0. The derivative of the function $f(\sigma_Z)$ at the point σ_i is equal to the tangent of the angle of inclination of the tangent drawn to the graph of the function at this point.

Виноградов А.Ю., Обязов В.А. Оценка значений прочностных характеристик грунта при нелинейной зависимости его сопротивления сдвигу от нормального давления // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2024. Т. 6. Вып. 1. С. 83–96. DOI: 10.34753/HS. 2024.6.1.83.

что состояние грунта при заданном нормальном давлении σ_0 в достаточной степени описывается уравнением касательной в точках с определенным нормальным давлением σ_0. Производная функции $f(\sigma_Z)$ в точке σ_i равна тангенсу угла наклона касательной, проведённой к графику функции в этой точке. Следовательно, тангенс угла внутреннего трения в точке σ_i будет равен первой производной степенной функции в этой точке. Оценку значения свободного члена уравнения c_i, получаемого расчетным путем, а не прямым измерением, предлагается выполнять методом интерполяции между двумя соседними парами измерений τ_i и σ_i. Сравнительный анализ результатов показал, что в области стандартных значений нормальной нагрузки (0,1÷0,3 МПа) степенная функция соответствует измеренным значениям не хуже, чем линейная, а в области меньших по величине значений нагрузки – аппроксимирует их значительно лучше.

Ключевые слова: грунты; прочностные свойства; уравнение Кулона; угол внутреннего трения; удельное сцепление; нормальная нагрузка; сопротивление сдвигу.

Therefore, the tangent of the angle of internal friction at the point σ_i will be equal to the first derivative of the power function at this point.

Keywords: soils; strength properties; Coulomb equation; angle of internal friction; specific soil adhesion; normal load; shear resistance.

Введение

Прочностные характеристики грунтов используются при расчетах параметров транспортно-сдвигового селевого потока [Виноградов, 1982], размывах русловых отложений и коренных пород берегов рек [Виноградов, Зубова, Парфенов, 2021], расчетов устойчивости оползневых склонов [Крюков, Бутенко, 2013; Шустер, Кризек, 1981], при проектировании оснований фундаментов зданий и сооружений, в том числе гидротехнических, по первой группе предельных состояний – по несущей способности. Параметры механических свойств грунтов (прочностные свойства), включающие: угол внутреннего трения φ, удельное сцепление c, необходимо оценивать согласно требований всех основных регламентирующих документов – СП 22.13330[1], СП 23.13330.2018[2], СП 24.13330[3]; СП 50-101-2004[4].

Сцепление грунта характеризует сопротивление структурных связей сдвигу связываемых ими частиц. Угол внутреннего трения грунта характеризуют сопротивление перемещению частиц грунта [Крамаренко, 2011]. Величины φ и c Цытович называет математическими параметрами уравнения, аппроксимирующего зависимость предельного сопротивления грунтов сдвигу от нормального давления [Цытович, 1983]:

$$\tau = tg\varphi \cdot \sigma + c \quad (1)$$

[1] СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция. СНиП 2.02.01-83*

[2] СП 23.13330.2018. Основания гидротехнических сооружений. Актуализированная редакция. СНиП 2.02.02-85

[3] СП 24.13330.2021. Свайные фундаменты. Актуализированная редакция. СНиП 2.02.03-85

[4] СП 50-101-2004 Проектирование и устройство оснований и фундаментов зданий и сооружений

Vinogradov A. Yu., Obyazov V. A. Estimation of the values of the strength characteristics of the soil with a nonlinear dependence of its shear resistance on normal pressure. *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2024, vol. 1, iss. 1, pp. 83–96. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2024.6.1.83.

Как мы показали [Виноградов, Обязов, 2023], большинство проектируемых водопропускных и водоотводных сооружений, в том числе сооружений инженерной защиты, создают давление на грунт меньшее рекомендованного ГОСТ 12248.1-2020[5] (таблица 8.1) и ГОСТ 12248.3-2020[6] (таблица 1) минимального значения нормального давления в 0,1 МПа (для нормальных инженерно-геологических условий). Для таких грунтов зависимость тангенциального напряжения от нормального, при значениях, меньших 0,3 МПа, неплохо аппроксимируется степенной функцией $\tau_i = a(\sigma_i)^b$.

Мы отдаем себе отчет, что предлагаемое нами незаслуженно забытое альтернативное уравнение сопротивления сдвигу вида $\tau_i = a(\sigma_i)^b$, хотя и отвечающее эмпирике, но, даже в случае его принятия инженерным сообществом, не соответствует существующей проектно-изыскательской нормативной базе.

Целью исследования является оценка величин отклонений коэффициентов $tg\varphi$ и c при использовании степенной зависимости между эмпирическими значениями тангенциальных и нормальных напряжений.

Материалы и методы

Для испытаний на одноплоскостной срез использовались монолиты и подготовленные образцы (п. 5.6 ГОСТ 12248.1-2020[5]) связных и несвязных грунтов четвертичных отложений. Испытания проводились по неконсолидированно-недренированной схеме (ГОСТ 12248-2010[7]).

Для проведения массовых испытаний в полевых условиях использовался компрессионный полевой прибор лаборатории Литвинова с площадью внутреннего сечения компрессионной гильзы 25 см^2.

Результаты

Зависимостью, наилучшим образом аппроксимирующей полученные эмпирическим путем значения тангенциальных сдвиговых напряжений в зависимости от нормальной нагрузки (при $\sigma_i < 0.3$), приложенной к образцу, является степенная. При расчетах устойчивости грунтов к внешним воздействиям – размывам, оползневым явлениям, нормальной нагрузке со стороны проектируемых сооружений, мы заранее знаем пределы таких воздействий, т.е., например, нормальное давление фундамента или дополнительной пригрузки σ_0 на грунт.

При использовании линейной зависимости между сопротивлением сдвига и нормальным давлением, коэффициенты уравнения определяются просто и при любой нагрузке имеют одинаковое значение (являются константами). Однако, при малых нормальных нагрузках, эта зависимость является нелинейной и коэффициент при переменной, как и свободный член уравнения, имеют различную величину при разных нагрузках.

Возникает вопрос: как оценивать эти коэффициенты в рамках существующей проектно-изыскательской нормативной базы?

Известно, что первая производная нелинейной функции в точке – суть тангенс угла наклона касательной к кривой функции в этой точке. Касательная – прямая вида $\tau_i = a\sigma_i + b$. Предположим, что уравнение этой касательной достаточно адекватно описывает состояние грунта при проектном (расчетном) напряжении σ_i. Тогда мы можем, ***для конкретной нагрузки***, оперировать привычными нам терминами и обозначениями: $tg\varphi$ и c.

При этом важно понимать, что физического смысла в параметрах линейного уравнения Кулона – $tg\varphi$ и c – нет, «параметры φ (угол внутреннего трения) и c (удельное сцепление) являются количественными характеристиками прочности грунта. Названия этих характеристик условные, они ***не имеют физического смысла*** и не отражают действительной природы сил сопротивления грунтов сдвигу. Их следует рассматривать лишь как математические параметры диаграммы сдвига грунта» [Алексеев, Калугин, 2011].

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

[6] ГОСТ 12248.3–2020. Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости методом трехосного сжатия

[7] ГОСТ 12248-2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости.

Однако, обычные математические коэффициенты ***не могут*** быть количественными характеристиками грунта. Это заблуждение глубоко укоренилось в понимании современной геотехники, только обращение к основоположникам механики грунтов ставит все на свои места: «величины $tg\varphi$ и c представляют собой ***лишь*** два эмпирические коэффициента в линейном уравнении (Кулона)» [Терцаги, 1961].

Понимание этого дает нам большую степень свободы в действиях с математическими зависимостями.

В качестве рабочей модели предлагаем следующий подход:

1. Принимаем, как однозначно отвечающий эмпирическим испытаниям грунтов на одноплоскостной сдвиг, степенной вид зависимости $\tau_i = f(\sigma_i)$:

$$\tau_i = a(\sigma_i)^b \quad (2)$$

2. Принимаем, что уравнение касательной в точке σ_0 в достаточной степени описывает состояние грунта при заданном нормальном давлении σ_0.

Уравнение касательной строим согласно [Романов, Романова, 2001] по следующему алгоритму:

- обозначить буквой σ_0 абсциссу точки касания.
- найти $f(\sigma_0)$.
- найти $f'(x)$ и $f'(\sigma_0)$.
- подставить найденные числа σ_0, $f(\sigma_0)$, $f(\sigma_0)$ в общее уравнение касательной $\tau_i = f(\sigma_0) + f(\sigma_0)(\sigma_i - \sigma_0)$).

В результате всех манипуляций получаем уравнение касательной к функции $\tau_i = f(\sigma_i)$ в точке *i*:

$$\tau_i = \sigma_i \cdot tg\varphi_i + c_i \quad (3)$$

3. Производная функции $f(\sigma_Z)$ в точке σ_i равна тангенсу угла наклона касательной, проведённой к графику функции в этой точке. Следовательно, тангенс угла внутреннего трения в точке σ_i будет равен первой производной степенной функции в этой точке:

$$tg\varphi_i = ab(\sigma_i^{b-1}) \quad (4)$$

Из предложенных допущений можно вывести зависимости для параметров степенного уравнения. Обозначения, для удобства восприятия оставляем прежние.

Из условия 1 и 2 получаем уравнение:

$$\tau_i = a(\sigma_i)^b = \sigma_i \cdot tg\varphi_i + c_i$$

С учетом (3):

$$\tau_i = ab\left(\sigma_i^{b-1}\right)\sigma_i + c_i = ab(\sigma_i)^b + c_i,$$

откуда:

$$c_i = a(\sigma_i)^b - ab(\sigma_i)^b$$

$$c_i = a(\sigma_i)^b(1-b) \quad (5)$$

Показатель степени b:

$$\tau_i = a(\sigma_i)^b = c_i/(1-b) \quad (6)$$

$$b = (\tau_i - c_i)/\tau_i = 1 - c_i/\tau_i \quad (7)$$

Коэффициент a:

$$\tau_i = a(\sigma_i)^b$$

$$a = \tau_i/(\sigma_i)^b$$

$$a = c_i/(\sigma_i)^b(1-b) \quad (8)$$

Возникает проблема в определении свободного члена уравнения c_i, получаемого расчетным путем, а не прямым измерением. Поскольку в уравнении касательной $\tau_i = \sigma_i \cdot tg\varphi_i + c_i$ все члены – как переменные, так и коэффициенты – меняются в зависимости от нормальной нагрузки σ_i, то оценка значения c_i производится методом интерполяции между двумя соседними парами измерений τ_i и σ_i:

$$c_i = \tau_i - \frac{\tau_i - \tau_{i-1}}{\sigma_i - \sigma_{i-1}}\sigma_i$$

При таких расчетах надо иметь в виду, что их результаты очень чувствительны к качеству измерений и требуют однородности отбираемых грунтов.

Наиболее простой метод для определения коэффициентов a и b, при наличии данных испытаний при малых нормальных нагрузках – графо-аналитический. Значения $tg\varphi_i$ (1) и c_i (1) оценивались с помощью построения аппроксимирующей прямой по двум соседним парам значений σ_i, σ_{i-1} и τ_i, τ_{i-1} (рисунок 1).

Поскольку испытания проводились при малых (0,02 МПа и меньше) и средних (0,1÷0,3 МПа) нормальных напряжениях, проверка методики проводилась по данным

измерений на неконсолидированный недренированный плоскостной срез (ГОСТ 12248–2010). Изменений влажности грунта по мере проведения опыта не происходило. Все расчеты проводились для соответствующих сил (кг).

Образец 1. Песок среднезернистый, монолит, плотность 2,12, влажность 0,15. Значения a_1 при величине b, полученной путем аппроксимации эмпирических значений сопротивления образца грунта срезу, при заданном нормальном напряжении (рисунок 2, b = 0,63), a_2 – при величине b, полученной по зависимости (7) (b = 0,58).

Значения угла внутреннего трения и сцепления для диапазона σ_i = 0,1÷0,3 МПа (25÷75 кг) (ГОСТ 12248-2010): $tg\varphi_i$ – 0,64; с – 7,67 кгс.

Результаты расчетов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Сравнительные значения угла внутреннего трения и сцепления, полученные с помощью линейной аппроксимации по двум соседним парам (1) σ_i, σ_{i-1} и τ_i, τ_{i-1} и степенной аппроксимации (зависимости 4 и 5) образца 1

Table 1. Comparative values of the angle of internal friction and soil adhesion obtained by linear approximation over two adjacent pairs (1) σ_i, σ_{i-1} and τ_i, τ_{i-1} and power approximation (dependences 4 and 5) of sample 1

σ_i	τ_i	a_1	a_2	b(7)	$tg\varphi_i$ (1)	$tg\varphi_i$ (4)	c_i (1)	c_i (5)
5	10,25	3,74	-	-	-	1,18	-	3,82
10	14	3,30	4,41	0,37	0,75	0,91	6,50	5,22
15	17,75	3,25	3,28	0,54	0,75	0,78	6,50	6,62
25	24	3,19	3,24	0,53	0,62	0,65	8,38	8,95
50	39	3,36	2,08	0,63	0,60	0,50	9,00	14,55
75	56	3,74	0,90	0,87	0,68	0,43	5,00	20,89
среднее	-	3,43	2,78	0,58	-	-	-	-

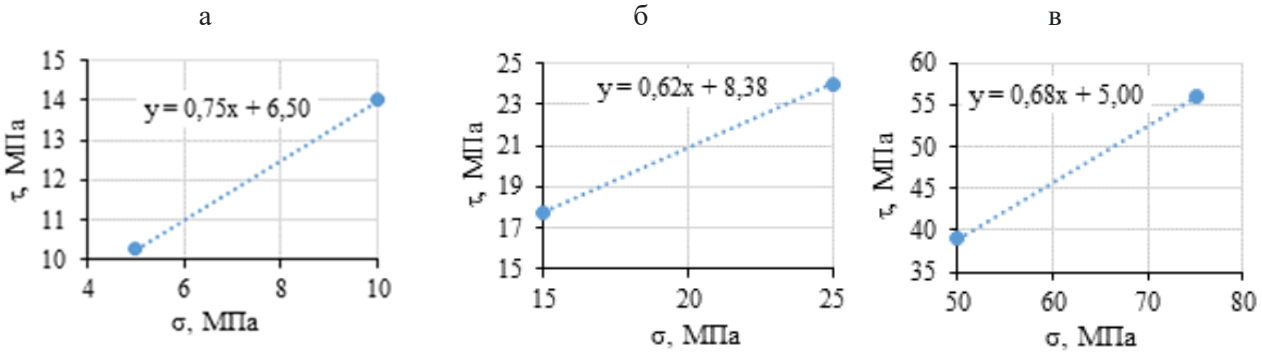


Рисунок 1. Значения угла внутреннего трения и сцепления, полученные с помощью линейной аппроксимации по двум соседним парам (1) σ_i, σ_{i-1} (5–10 (а); 15–25 (б); 50–75 (в) кг) и соответствующим им τ_i, τ_{i-1}

Figure 1. The values of the angle of internal friction and soil adhesion obtained by linear approximation for two adjacent pairs (1) σ_i, σ_{i-1} (5–10; 15–25; 50–75 kg) and corresponding τ_i, τ_{i-1}

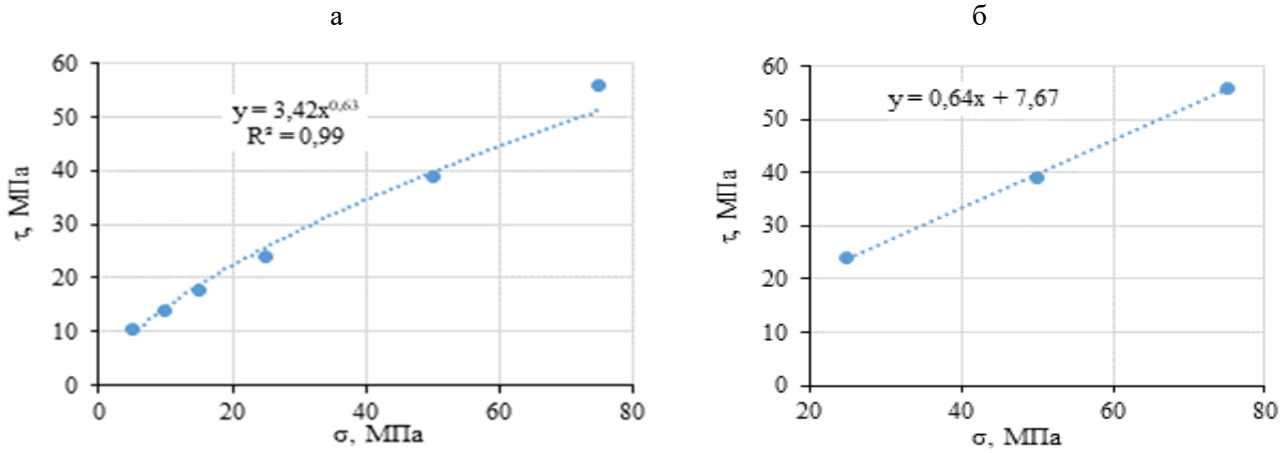


Рисунок 2. Оценка коэффициента и показателя степени для аппроксимирующей степенной функции (а) и угла внутреннего трения и сцепления, полученные с помощью линейной аппроксимации (б). Образец 1

Figure 2. Estimation of the coefficient and exponent for the approximating power function (a) and the angle of internal friction and adhesion obtained using linear approximation (b). Sample 1

Образец 2. Супесь, ИГЭ-1 (инженерно-геологический элемент) переработанные пробы, плотность 1,42, влажность 0,20. Значения a_1 при величине b, полученной путем аппроксимации эмпирических значений сопротивления образца грунта срезу, при заданном нормальном напряжении (рисунок 3, b = 0,51), a_2 – при величине b, полученной по зависимости (7) (b = 0,53).

Значения угла внутреннего трения и сцепления для диапазона σ_i = 0,1÷0,3 МПа (25÷75 кг) (ГОСТ 12248-2010): $tg\varphi_i$ – 0,28; с – 17,30 кгс.

Результаты расчетов приведены в таблице 2.

Таблица 2. Сравнительные значения угла внутреннего трения и сцепления, полученные с помощью линейной аппроксимации по двум соседним парам (1) σ_i, σ_{i-1} и τ_i, τ_{i-1} и степенной аппроксимации (зависимости 4 и 5) образца 2

Table 2. Comparative values of the angle of internal friction and soil adhesion obtained by linear approximation over two adjacent pairs (1) σ_i, σ_{i-1} and τ_i, τ_{i-1} and power approximation (dependences 4 and 5) of sample 2

σ_i	τ_i	a_1	a_2	b(7)	$tg\varphi_i$ (1)	$tg\varphi_i$ (4)	c_i (1)	c_i (5)
0,6	3,7	4,79	-	-	-	2,668		1,8
1,0	4,6	4,60	3,70	0,36	2,25	2,073	2,35	2,3
2,5	5,9	3,71	3,87	0,19	0,867	1,318	3,73	2,9
5,0	6,8	3,01	4,62	0,15	0,36	0,936	5,00	3,4
7,5	9,3	3,36	1,55	0,74	1,00	0,766	1,80	4,6
10,0	14,5	4,52	0,20	1,68	2,08	0,665	-6,30	7,2
25,0	24,0	4,71	3,55	0,44	0,633	0,423	8,17	11,9
50,0	31,5	4,35	7,07	0,31	0,30	0,300	16,50	15,6
75,0	37,8	4,25	5,60	0,40	0,252	0,246	18,90	18,7
среднее		4,15	3,77	0,53				

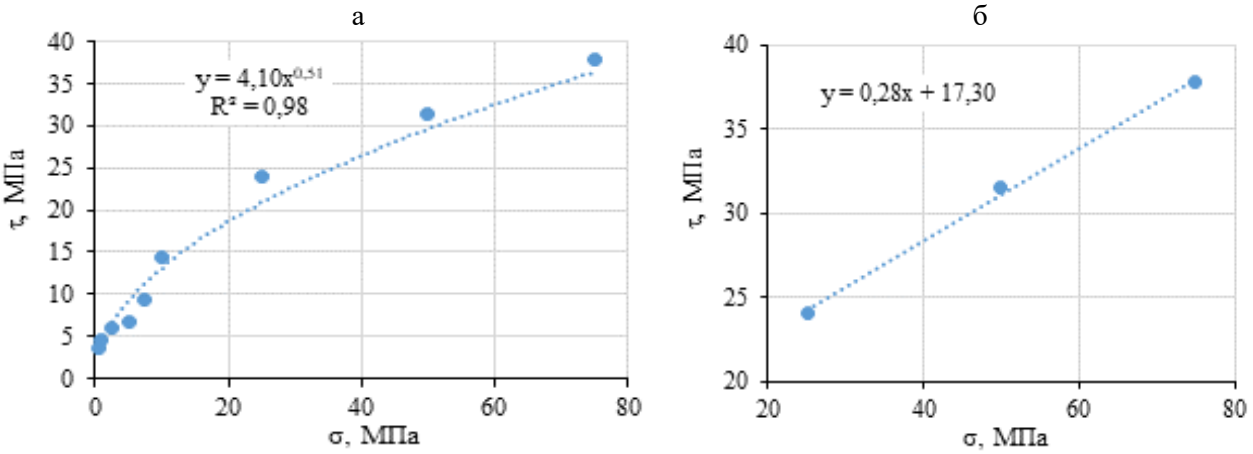


Рисунок 3. Оценка коэффициента и показателя степени для аппроксимирующей степенной функции (а) и угла внутреннего трения и сцепления, полученные с помощью линейной аппроксимации (б). Образец 2

Figure 3. Estimation of the coefficient and exponent for the approximating power function (a) and the angle of internal friction and adhesion obtained using linear approximation (b). Sample 2

Образец 3. Супесь ИГЭ-2 пластичная, монолит, выдержанная в герметичном контейнере 1 час после вскрытия пласта, плотность 1,95, влажность 0,18. Значения a_1 при величине b, полученной путем аппроксимации эмпирических значений сопротивления образца грунта срезу, при заданном нормальном напряжении (рисунок 4, b = 0,48), a_2 – при величине b, полученной по зависимости (7) (b = 0,40).

Значения угла внутреннего трения и сцепления для диапазона σ_i = 0,1÷0,3 МПа (25÷75 кг) (ГОСТ 12248-2010[7]): $tg\varphi_i$ – 0,35; с – 19,17 кгс.

Результаты расчетов приведены в таблице 3.

Таблица 3. Сравнительные значения угла внутреннего трения и сцепления, полученные с помощью линейной аппроксимации по двум соседним парам (1) σ_i, σ_{i-1} и τ_i, τ_{i-1} и степенной аппроксимации (зависимости 4 и 5) образца 3

Table 3. Comparative values of the angle of internal friction and soil adhesion obtained by linear approximation over two adjacent pairs (1) σ_i, σ_{i-1} and τ_i, τ_{i-1} and power approximation (dependences 4 and 5) of sample 3

σ_i	τ_i	a_1	a_2	b(7)	$tg\varphi_i$ (1)	$tg\varphi_i$ (4)	c_i (1)	c_i (5)
5	12,5	5,80	-	-	-	1,185	-	6,53
10	17,5	5,83	4,98	0,40	1,0	0,825	7,5	9,14
15	20	5,49	8,07	0,29	0,50	0,668	12,5	10,45
25	27,5	5,91	3,27	0,56	0,75	0,511	8,75	14,37
50	37,5	5,79	6,63	0,36	0,40	0,356	17,5	19,59
75	45	5,73	6,67	0,40	0,30	0,288	22,5	23,51
среднее		5,76	5,92	0,40	-	-	-	-

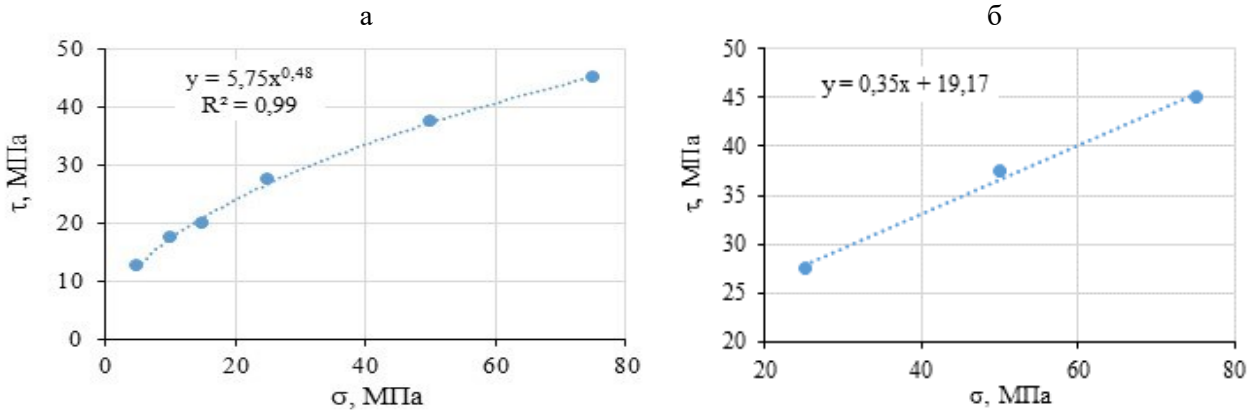


Рисунок 4. Оценка коэффициента и показателя степени для аппроксимирующей степенной функции (а) и угла внутреннего трения и сцепления, полученные с помощью линейной аппроксимации (б). Образец 3

Figure 4. Estimation of the coefficient and exponent for the approximating power function (a) and the angle of internal friction and adhesion obtained using linear approximation (b). Sample 3

Образец 4. Супесь пластичная ИГЭ-2, переработанная и испытанная в течение 10 минут после вскрытия пласта, плотность 1,98, влажность 0,172. Значения a_1 при величине b, полученной путем аппроксимации эмпирических значений сопротивления образца грунта срезу, при заданном нормальном напряжении (рисунок 5, b = 0,34), a_2 – при величине b, полученной по зависимости (7) (b = 0,29).

Значения угла внутреннего трения и сцепления для диапазона σ_i = 0,1÷0,3 МПа (25÷75 кг) (ГОСТ 12248-2010): $tg\varphi_i$ – 0,35; c – 19,02 кгс.

Результаты расчетов приведены в таблице 4.

Таблица 4. Сравнительные значения угла внутреннего трения и сцепления, полученные с помощью линейной аппроксимации по двум соседним парам (1) σ_i, σ_{i-1} и τ_i, τ_{i-1} и степенной аппроксимации (зависимости 4 и 5) образца 4

Table 4. Comparative values of the angle of internal friction and soil adhesion obtained by linear approximation over two adjacent pairs (1) σ_i, σ_{i-1} and τ_i, τ_{i-1} and power approximation (dependences 4 and 5) of sample 4

σ_i	τ_i	a_1	a_2	b(7)	$tg\varphi_i$ (1)	$tg\varphi_i$ (4)	c_i (1)	c_i (5)
5	17,50	10,14	9,06	-	-	1,17	-	11,57
10	22,50	10,31	12,33	0,286	1,0	0,74	12,5	14,87
15	25,00	9,98	15,43	0,222	0,5	0,57	17,5	16,53
25	27,5	9,23	6,58	0,150	0,25	0,40	21,25	18,18
50	37,55	9,97	6,39	0,365	0,40	0,26	17,45	24,82
75	45,25	10,47	9,96	0,410	0,31	0,20	22,15	29,91
среднее		10,02	9,06	0,287	-	-	-	-

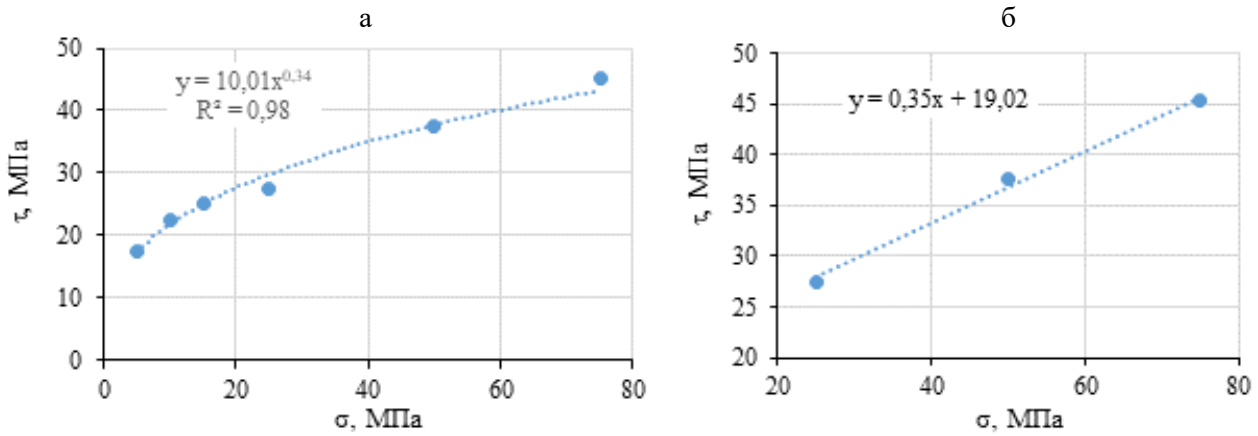


Рисунок 5. Оценка коэффициента и показателя степени для аппроксимирующей степенной функции (а) и угла внутреннего трения и сцепления, полученные с помощью линейной аппроксимации (б). Образец 4

Figure 5. Estimation of the coefficient and exponent for the approximating power function (a) and the angle of internal friction and adhesion obtained using linear approximation (b). Sample 4

Образец 5. Супесь твердая ИГЭ-3, монолит, испытания проведены в течение 10 минут после вскрытия пласта, плотность 2,08, влажность 0,168. Значения a_1 при величине b, полученной путем аппроксимации эмпирических значений сопротивления образца грунта срезу, при заданном нормальном напряжении (рисунок 6, b = 0,30), a_2 – при величине b, полученной по зависимости (7) (b = 0,26).

Значения угла внутреннего трения и сцепления для диапазона σ_i = 0,1÷0,3 МПа (25÷75 кг) (ГОСТ 12248-2010): $tg\varphi_i$ – 0,38; c – 45,83 кгс.

Результаты расчетов приведены в таблице 5.

Таблица 5. Сравнительные значения угла внутреннего трения и сцепления, полученные с помощью линейной аппроксимации по двум соседним парам (1) σ_i, σ_{i-1} и τ_i, τ_{i-1} и степенной аппроксимации (зависимости 4 и 5) образца 5

Table 5. Comparative values of the angle of internal friction and soil adhesion obtained by linear approximation over two adjacent pairs (1) σ_i, σ_{i-1} and τ_i, τ_{i-1} and power approximation (dependences 4 and 5) of sample 5

σ_i	τ_i	a_1	a_2	b(7)	$tg\varphi_i$ (1)	$tg\varphi_i$ (4)	c_i (1)	c_i (5)
5	32,5	20,02	-	-	-	1,987	-	22,72
10	40	20,00	19,10	0,231	1,50	1,224	25,0	27,96
15	47,5	21,02	14,49	0,375	1,50	0,922	25,0	33,20
25	55	20,87	22,16	0,237	0,75	0,645	36,3	38,45
50	65	20,02	27,01	0,182	0,40	0,397	45,0	45,44
75	73,75	20,11	20,33	0,269	0,35	0,299	47,5	51,55
среднее		20,34	20,62	0,259	-	-	-	-

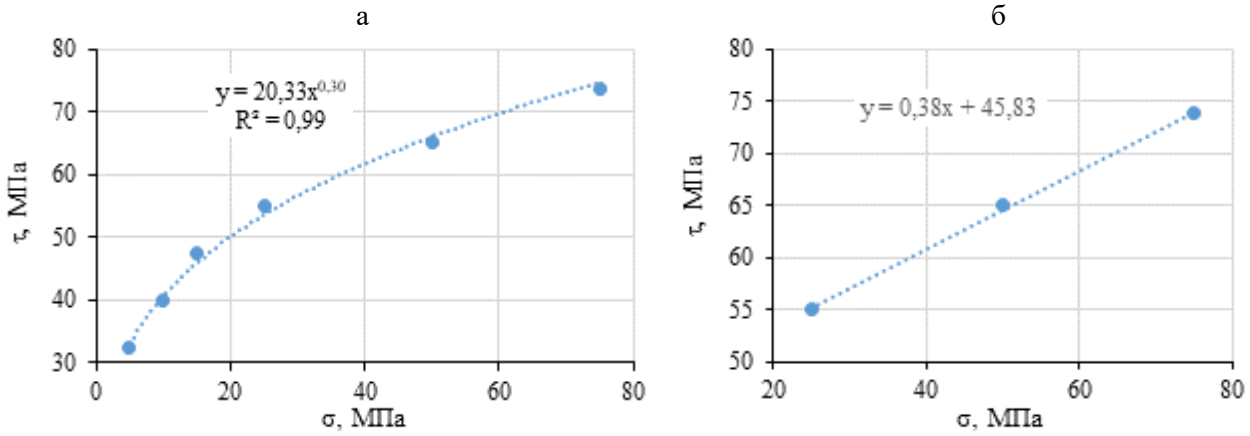


Рисунок 6. Оценка коэффициента и показателя степени для аппроксимирующей степенной функции (а) и угла внутреннего трения и сцепления, полученные с помощью линейной аппроксимации (б). Образец 5

Figure 6. Estimation of the coefficient and exponent for the approximating power function (a) and the angle of internal friction and adhesion obtained using linear approximation (b). Sample 5

Образец 6. Супесь пластичная ИГЭ-3, монолит, взятая совместно с 5 образцом из того же грунтового горизонта, испытания проведены с задержкой 1 час, плотность 2,01, влажность 0,166. Значения a_1 при величине b, полученной путем аппроксимации эмпирических значений сопротивления образца грунта срезу, при заданном нормальном напряжении (рисунок 7, b = 0,48), a_2 – при величине b, полученной по зависимости (7) (b = 0,41).

Значения угла внутреннего трения и сцепления для диапазона σ_i = 0,1÷0,3 МПа (25÷75 кг) (ГОСТ 12248-2010): $tg\varphi_i$ – 0,28; c – 25,83 кгс.

Результаты расчетов приведены в таблице 6.

Таблица 6. Сравнительные значения угла внутреннего трения и сцепления, полученные с помощью линейной аппроксимации по двум соседним парам (1) σ_i, σ_{i-1} и τ_i, τ_{i-1} и степенной аппроксимации (зависимости 4 и 5) образца 6

Table 6. Comparative values of the angle of internal friction and soil adhesion obtained by linear approximation over two adjacent pairs (1) σ_i, σ_{i-1} and τ_i, τ_{i-1} and power approximation (dependences 4 and 5) of sample 6

σ_i	τ_i	a_1	a_2	b(7)	$tg\varphi_i$ (1)	$tg\varphi_i$ (4)	c_i (1)	c_i (5)
5	12,5	5,80	-	-	-	1,290	-	6,54
10	20	6,67	3,14	0,600	1,50	0,898	5,0	10,46
15	22,5	6,18	10,16	0,250	0,50	0,727	15,0	11,76
25	32,5	6,99	2,63	0,667	1,00	0,556	7,5	16,99
50	40	6,18	13,18	0,231	0,30	0,387	25,0	20,91
75	46,25	5,89	10,38	0,313	0,25	0,313	27,5	24,18
среднее		6,29	7,90	0,412	-	-	-	-

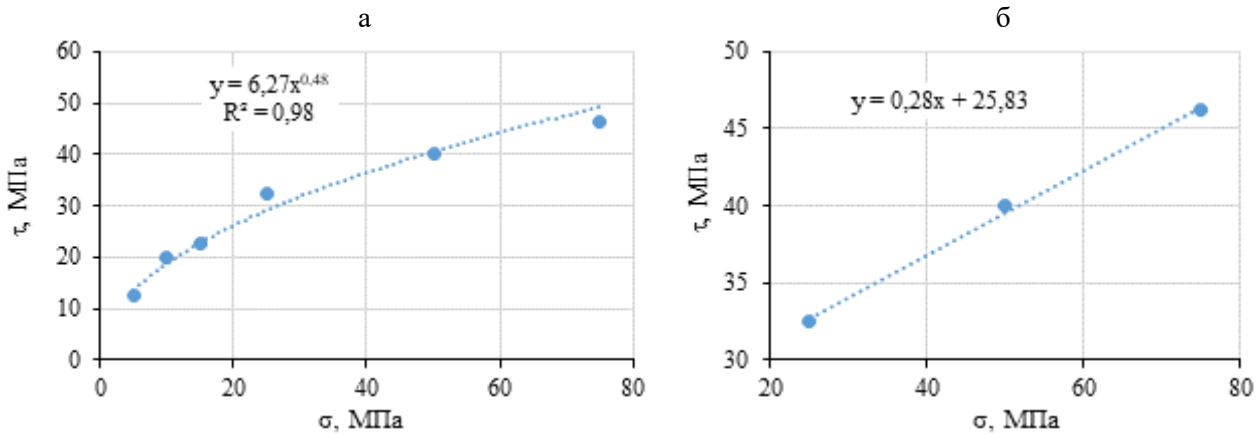


Рисунок 7. Оценка коэффициента и показателя степени для аппроксимирующей степенной функции (а) и угла внутреннего трения и сцепления, полученные с помощью линейной аппроксимации (б). Образец 6

Figure 7. Estimation of the coefficient and exponent for the approximating power function (a) and the angle of internal friction and adhesion obtained using linear approximation (b). Sample 6

Измерения проводились в диапазоне нормальных нагрузок 5,0÷75,0 кг (0,02÷0,3 МПа). Для пары нормальных нагрузок в диапазоне σ_i =25,0÷75,0 кг (0,1÷0,3 МПа) расхождение между значениями свободного члена (сцепления) полученными путем интерполяции (ГОСТ 12248–2010[7]) и предложенными не превысило 10 % (таблица 7), коэффициента (угла внутреннего трения) – 20 % (таблица 8).

Таблица 7. Различие в оценке значений свободного члена (сцепления) в уравнении Кулона и в уравнении касательной, осредненные для отрезка $\sigma_i = 25{,}0 \div 75{,}0$ кг (0,1÷0,3 МПа)

Table 7. The difference in the estimation of the values of the free term (soil adhesion) in the Coulomb equation and in the tangent equation, averaged for the segment $\sigma_i = 25{,}0 \div 75{,}0$ кг (0,1÷0,3 МПа)

Вид грунта		песок	супесь				
№ образца		1	2	3	4	5	6
Вид аппроксимации:	линейная, кг	7,7	17,3	19,2	19,0	45,1	25,8
	степенная, кг	14,8	15,4	19,2	24,3	45,8	20,7
Погрешность, доли единицы		-0,48	0,12	0,00	-0,22	-0,02	0,25

Таблица 8. Различие в оценке значений коэффициента при переменной (тангенса угла внутреннего трения) в уравнении Кулона и в уравнении касательной, осредненные для отрезка $\sigma_i = 25{,}0 \div 75{,}0$ кг (0,1÷0,3 МПа)

Table 8. The difference in the estimation of the coefficient values for a variable (the tangent of the angle of internal friction) in the Coulomb equation and in the tangent equation, averaged for the segment $\sigma_i = 25{,}0 \div 75{,}0$ кг (0,1÷0,3 МПа)

Вид грунта		песок	супесь				
№ образца		1	2	3	4	5	6
Вид аппроксимации:	линейная, кг	0,64	0,276	0,350	0,355	0,375	0,275
	степенная, кг	0,52	0,323	0,385	0,285	0,447	0,419
Погрешность, доли единицы		0,23	-0,15	-0,09	0,25	-0,16	-0,34

Если различие в оценке значений свободного члена (сцепления) в уравнении Кулона и в уравнении касательной в точке σ_i невелико (по Дмитриеву и Яргу для песков – 80 %, для супесей – 47 %), то в случае коэффициента при переменной (тангенса угла внутреннего трения) в одном случае для супесей оно достигает 34 %. Эта погрешность превышает лабораторную по [Дмитриев, Ярг, 2008] которая для супесей принята равной 12 %. Такая же

картина и для песков – погрешность 23 %, лабораторная – 11 %.

На основании оценки лабораторных погрешностей, данных в фундаментальной работе [Дмитриев, Ярг, 2008], можно сделать предварительный вывод, что в диапазоне давлений 0,1÷0,3 МПа для оценки c_i имеем удовлетворительное совпадение значений, а для $tg\varphi_i$ – неудовлетворительное.

При проведении такого анализа надо иметь в виду, что оценки лабораторных погрешностей [В.В. Дмитриев и Л.А. Ярг, 2008] проводились для метода консолидированного среза, что уменьшает ошибку в определении угла внутреннего трения в 2–3 раза за счет трансформации образцов под предварительным максимальным нормальным воздействием (ГОСТ 12248.1-2020) в некоторую усредненную субстанцию.

Нами проводилась качественная оценка проведения консолидированно-дренированных испытаний на одноплоскостной срез одного и того же суглинка полутвердого с одинаковыми водно-физическими характеристиками двумя различными сертифицированными лабораториями в 2002 и 2019 гг..

Согласно (ГОСТ 12248.1-2020[5]), для определения частных значений $tg\varphi_i$ и c_i необходимо провести не менее трех испытаний идентичных образцов при различных значениях нормального напряжения. Для контроля качества испытания [В.В. Дмитриев и Л.А. Ярг, 2008] рекомендуют через опытные точки провести осредняющую прямую. Прочностные характеристики определяют по полученному графику зависимости $\tau_i = f(\sigma_i)$.

В нашем случае, помимо осредняющей прямой, мы интерполировали значения $tg\varphi_i$ и c_i и по соседним парам опытных значений. Результаты приведены в таблице 9.

Таблица 9. Средние значения и максимальные расхождения при определении значений $tg\varphi_i$ и c_i для суглинка полутвердого, проведенные различными лабораториями в 2002 и 2019 гг. Плотность 2,25 г/см^3, степень водонасыщения 0,99

Table 9. Average values and maximum discrepancies in determining the values of $tg\varphi_i$ and c_i for semi-solid loam, conducted by various laboratories in 2002 and 2019. The density is 2.25 g/cm3, the degree of water saturation is 0.99

Год испытаний	2002 г.				2019 г.			
диапазон σ_i, МПа	$tg\varphi_i$ ср	$tg\varphi_i$ макс	c_i ср, МПа	c_i макс, МПа	$tg\varphi_i$ ср	$tg\varphi_i$ макс	c_i ср, МПа	c_i макс, МПа
0,1–0,2	0,48	0,6	0,03	0,01	0,45	0,29	0,14	0,13
0,2–0,3	0,50	0,35	0,03	0,06	0,53	0,78	0,12	0,03

Из приведенного анализа видно, что ошибка в определении угла внутреннего трения в 2002 г. составляла в среднем – 4 %, максимальный разброс – 42 %; В 2019 г. – 15 и 63 % соответственно. Средняя ошибка в определении искомой характеристики за 2002 и 2019 гг. при этом равна нулю ($tg\varphi_{ср}$ =0,49)! При этом средняя ошибка в определении c_i составила 333 % (в 2002 г. c_i =0,03, а в 2019 г. c_i =0,13 МПа)!

Для еще 5 типов связных грунтов, лабораторные испытания которых проводились в этих же лабораториях, разброс в значениях $tg\varphi_i$ и c_i был близким к приведенным в таблице 9 значениям.

При таких внутрилабораторных погрешностях в определении прочностных характеристик одинаковых грунтов, можно сделать вывод об удовлетворительности приведенных в таблицах 7 и 8 результатах.

На основании принятой степенной аппроксимации зависимости $\tau_i = f(\sigma_i)$ в качестве примера оценим диапазон изменчивости значений $tg\varphi_i$ и c_i для образца 2. Результаты приведены в таблице 10.

Таблица 10. Супесь ИГЭ 1, переработанные пробы. Изменение величины коэффициента при переменной и свободного члена ($tg\varphi_i$ и c_i) в зависимости от величины нормального давления σ_i
Table 10. IGE 1 sandy loam, processed samples. The change in the value of the coefficient for a variable and a free term ($tg\varphi_i$ и c_i) depending on the value of the normal pressure σ_i

Показатель, единица измерения	Вид аппроксимации						
	линейная	степенная					
σ_i, МПа	0,1–0,3	0,1–0,3	0,04–0,1	0,02–0,04	0,01–0,02	0,004–0,01	0,002–0,004
c_i, кг	17,3	15,4	9,5	5,0	3,1	2,6	2,1
c_i, МПа	0,069	0,061	0,038	0,02	0,013	0,01	0,008
$tg\varphi_i$	0,276	0,323	0,544	0,789	1,127	1,696	2,371

Как видно из приведенной таблицы, величина c_i при изменении нормального давления от 0,3 до 0,004 МПа падает в семь раз. Величина $tg\varphi_i$, напротив, растет в семь раз. Таким образом, в уравнении $\tau_i = \sigma_i \cdot tg\varphi_i + c_i$ при небольшом нормальном давлении σ_i, невзирая на рост коэффициента $tg\varphi_i$ при переменной σ_i, первый член правой части стремится к нулю, а свободный член c_i уменьшается, что говорит о завышенной оценке стабильности малонагруженных и ненагруженных грунтов.

«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, 1983]. Исходя из этого, можно сделать выводы, что оценка устойчивости природных (ненагруженных нормальной нагрузкой) склонов и устойчивости земляных сооружений – в том числе грунтовых плотин, при использовании линейного уравнения Кулона будет завышена.

Выводы

1. Аппроксимация степенной функцией зависимости сопротивления грунта сдвигу от нормального усилия не хуже, чем линейной, даже для стандартных значений нормальной нагрузки (0,1÷0,3 МПа – ГОСТ 12248.1-2020).

2. При учете значений нормальной нагрузки, меньших по величине, чем условное значение сцепления, полученного согласно требованиям ГОСТ 12248.1-2020, степенная функция значительно лучше соответствует измеренным значениям.

3. Прочностные характеристики грунта, полученные на основании гипотезы о линейной зависимости тангенциального и нормального напряжений при нормальных напряжениях меньших 0,1 МПа приводят к завышенному представлению о стабильности грунтов.

4. Угол внутреннего трения и сцепление в традиционном понимании являются переменными, зависящими от нормального давления.

Литература

Алексеев В. М., Калугин П. И. Полевые методы исследования механических свойств грунтов: учебное пособие для студентов, обучающихся по направлению 270100 «Строительство». Воронеж: Воронежский государственный архитектурно-строительный университет, 2011. 112 с.

Виноградов А.Ю., Зубова О.В., Парфенов Е.А. Расчет эрозионного размыва связного грунта // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2021. № 235. С. 187–195.

References

Alekseev V. M., Kalugin P. I. *Polevye metody issledovaniya mekhanicheskih svojstv gruntov: uchebnoe posobie dlya studentov, obuchayushchihsya po napravleniyu 270100 «Stroitel'stvo». [Field methods for studying the mechanical properties of soils: a textbook for students studying in the direction 270100 «Construction»]* Voronezh, Publ. Voronezhskij gosudarstvennyj arhitekturno-stroitel'nyj universitet, 2011, 112 p. (In Russian).

Vinogradov A.Yu., Zubova O.V., Parfenov E.A. Raschet erozionnogo razmyva svyaznogo grunta

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

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

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

Крамаренко В.В. Грунтоведение: учебное пособие. Томск: Из-во ТПУ, 2011. 431 с.

Крюков Е. В., Бутенко В. М. Опасные природные процессы: учеб.-метод. пособие. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2013. 119 с.

Романов П.Ю., Романова Т.Е., Уравнение касательной к графику функции // Математика. Первое сентября. 2001. № 16. С. 17–20.

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

Цытович Н.А. Механика грунтов (краткий курс): учебник для строит. вузов. 4 изд. М.: Высшая школа, 1983. 288 с.

Шустер Р., Кризек Р. Оползни. Исследование и укрепление. М.: МИР, 1981, 368 с.

[Calculation of erosion scour of cohesive soil*]. Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoj akademii [Proceedings of the St. Petersburg Forestry Academy].* 2021, vol 235, pp. 187–195. (In Russian).

Vinogradov A.Yu., Obyazov V.A. Ob approksimacii zavisimosti soprotivleniya grunta sdvigu ot normal'nogo davleniya [About the approximation of the dependence of soil shear resistance on normal pressure*]. Gidrosfera. Opasnye processy i yavleniya. [Hydrosphere. Hazard processes and phenomena],* 2023, vol. 5, iss. 3, pp. 283–291. (In Russian).

Vinogradov Yu. B. *Etyudy o selevyh potokah [Studies on mudflows].* Leningrad, Publ. Hydrometeoizdat 1980, 144 p. (In Russian).

Dmitriev V.V., Yarg L.A. *Metody i kachestvo laboratornogo izucheniya gruntov: uchebnoe posobie. [Methods and quality of laboratory soil study: study guide]*. Moscow: Publ. KDU, 2008, 542 p. (In Russian).

Kramarenko V.V. *Gruntovedenie: uchebnoe posobie. [Soil science: a textbook]*. Tomsk: Publ. Iz-vo TPU, 2011, 431 p. (In Russian).

Kryukov E. V., Butenko V. M. *Opasnye prirodnye processy: ucheb.-metod. posobie. [Dangerous natural processes: educational and methodical manual].* Moscow: Publ. Akademiya GPS MCHS Rossii, 2013, 119 p. (In Russian).

Romanov P.YU., Romanova T.E. Uravnenie kasatel'noj k grafiku funkcii [The equation of the tangent to the graph of the function]. *Matematika. Pervoe sentyabrya [Mathematics. The first of September].* 2001, vol 16, pp. 17–20. (In Russian).

Terczagi K. *Teoriya mexaniki gruntov [Theory of soil mechanics]*. Moscow: Publ. Gostrojizdat, 1961, 507 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].* Moscow: Publ. Vy`sshaya shkola, 1983, 288 p. (In Russian).

Shuster R., Krizek R. *Opolzni. Issledovanie i ukreplenie. [Landslides. Research and strengthening]*. Moscow: Publ. MIR, 1981, 368 p. (In Russian).

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

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

1. Фундаментальные проблемы гидросферы Земли
2. Опасные процессы в гидросфере: фундаментальные и инженерные аспекты
3. Экологические проблемы и опасности в гидросфере
4. Эволюция гидросферы
5. Методы, модели и технологии
6. Вопросы совершенствования нормативной документации
7. Мониторинговые, экспериментальные и экспедиционные исследования
8. 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 К. Прищепа, В. Солонович
Подписано в печать 10.11.2024. Формат: 60x84/8
Бумага: офсетная. Печать плоская Усл. печ. л. 19,2. Тираж 50 экз. Заказ № ____
Выход в свет __.__.2024
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



Солонович Виктория. *Тайная жизнь пруда*

ISSN 2686-7877

© 2024. «Гидросфера. Опасные процессы и явления». Все права защищены