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

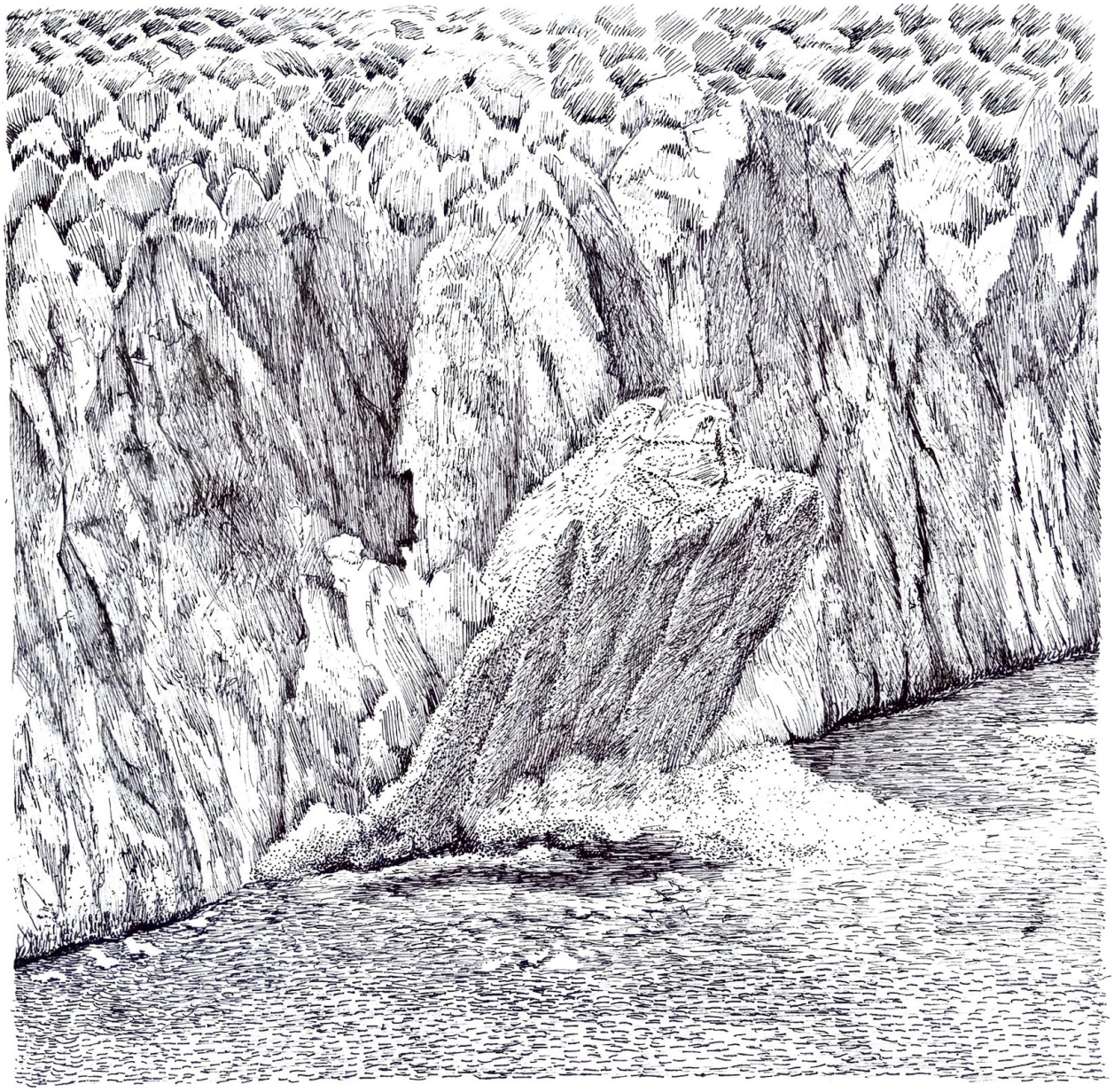
ГИДРОСФЕРА

ОПАСНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ



www.hydro-sphere.ru

Том 5 Выпуск 1



«Таяние ледника»

ГИДРОСФЕРА. ОПАСНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ

Том 5, 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 5, 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**, Бай-

Editorial Board

Victor N. Beznosov, Doctor of Science, Principal Researcher of the Scientific Production Association «Gidrotechproekt» (Saint-Petersburg, Russia)
Victor P. Blagovechshenskiy, Doctor of Science, Head of the Laboratory of Natural Hazards, Institute of Geography of the Republic of Kazakhstan (Almaty, Kazakhstan)
Fedor F. Bryukhan, Doctor of Science, professor of the Department of Engineering Survey and Geoecology of Moscow State University of Civil Engineering (Moscow, Russia)
Sergey S. Chernomorets, Associate Professor, Senior Researcher of the Laboratory of Snow Avalanches and Debris Flows of the Lomonosov Moscow State University, and President of the Debris Flow Association (Moscow, Russia)
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

кальский институт природопользования 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)
докт. физ.-мат. наук **А.И. Зайцев**, Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований Дальневосточного отделения Российской академии наук, заведующий лабораторией вычислительной гидромеханики и океанографии (г. Южно-Сахалинск, Россия)
докт. геогр. наук, проф. **Н.А. Калинин**, Пермский государственный национальный исследовательский университет, заведующий кафедрой метеорологии и охраны атмосферы (г. Пермь, Россия)
академик РАН **Б.М. Кизяев**, Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова, научный руководитель (г. Москва, Россия)
докт. геол.-мин. наук, доц. **А.А. Лаврусевич**, Московский государственный строительный университет, заведующий кафедры инженерных изысканий и геоэкологии (г. Москва, Россия)
академик НАН 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)

Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (Yuzhno-Sakhalinsk, Russia)
Sven Fuchs, Doctor of Sciences, Deputy of Head of the Institute of Mountain Risk Engineering of the BOKU University (Vienna, Austria)
Endon Zh. Garmaev, 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

проф. **К. Нишимура**, Японская ассоциации снега и льда, президент (г. Токио, Япония)
докт. геогр. наук **А.В. Панин,** Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, профессор кафедры геоморфологии и палеогеографии (г. Москва, Россия)
академик НАН РК **И.В. Северский**, Институт географии Республики Казахстан, почётный директор; научный руководитель фундаментальных и прикладных исследований лаборатории гляциологии; вице-президент Международной гляциологической ассоциации (г. Алматы, Казахстан)
канд. геогр. наук, доцент **С.А. Сократов,** Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, заместитель декана географического факультета по научной работе (г. Москва, Россия)
докт. геогр. наук, проф. **Е.А. Таланов,** Казахский национальный университет имени Аль-Фараби, профессор кафедры метеорологии и гидрологии (г. Алматы, Казахстан)
академик РАН **А.К. Тулохонов,** Байкальский институт природопользования Сибирского отделения Российской академии наук, научный руководитель (г. Улан-Удэ, Россия)
канд. 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. **С. Фукс**, Институт горных рисков Университета природных ресурсов и наук о жизни, заместитель директора (г. Вена, Австрия)
канд. геогр. наук, доц. **С.С**. **Черноморец**, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, старший научный сотрудник лаборатории снежных лавин и селей географического факультета, президент Селевой ассоциации (г. Москва, Россия)
канд. геогр. наук **П.А. Черноус**, Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований Дальневосточного отделения Российской академии наук, ведущий научный сотрудник лаборатории экзогенных геодинамических процессов и снежного покрова (г. Южно-Сахалинск, Россия)
канд. тех. наук **С.В. Шварёв**, Институт географии Российской академии наук, заведующий лабораторией геоморфологии (г. Москва, Россия)
докт. **С. Ямагучи**, Научно-исследовательский центр снега и льда Национального исследовательAcademy of Sciences (Sevastopol, Russia)
Kouichi Nishimura, Professor, President of Japanese Society of Snow and Ice (Tokyo, Japan)
Andrey V. Panin, Doctor of Science, professor of the Department of Geomorphology and Paleogeography of Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia)
Igor V. Severskiy, Academician of the National Academy of Sciences of Kazakhstan, Scientific leader of fundamental and applied researches of the Department of Glaciology of the Institute of Geography of Kazakhstan (Almaty, Kazakhstan)
Sergey V. Shvarev, Ph.D., Head of the Laboratory of Geomorphology of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)
Sergey A. Sokratov, Ph.D. in Environmental & Earth Sci., Associate Professor, Deputy Dean for Research of the Faculty of Geography of Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia)
Yevgeniy A. Talanov, Professor, Professor of the Meteorology and Hydrology Department Al-Farabi Kazakh National University, (Almaty, Kazakhstan)
Arnold K. Tulokhonov, Academician of the Russian Academy of Sciences Scientific, Scientific Director of the Baikal Institute of Nature Management Siberian branch of the Russian Academy of sciences (Ulan-Ude, Russia)
Tatiana A. Vinogradova, Associate Professor, Senior Researcher of the Scientific Production Association «Gidrotechproekt» (Saint-Petersburg, Russia)
Fangqiang Wei, Professor, Vice-Director of the Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences (Chongqing, China)
Kouichi Nishimura, Professor, President of Japanese Society of Snow and Ice (Tokyo, Japan)
Satoru Yamaguchi, Ph.D., Chief Researcher of the Snow and Ice Research Division of the National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (Nagaoka, Japan)
Andrey I. Zaitsev, Doctor of Science, Head of Laboratory of Computational Hydromechanics and Oceanography of Special Research Bureau for Automation of Marine Researches, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (Yuzhno-Sakhalinsk, Russia)

ского института наук о Земле и устойчивости к стихийным бедствиям, старший научный сотрудник (г. Нагаока, Япония)

Технический редактор

Информацию о принятых в печать материалах можно получить на сайте журнала или у технического редактора **Круковской Ольги Юрьевны**, e-mail info@hydro-sphere.ru.
Сведения о вышедших номерах и условиях подписки на сайте журнала: www.hydro-sphere.ru.
Свидетельство о регистрации СМИ **ПИ № ФС 77-76914** от 11.10.2019.

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

ИЗДАТЕЛЬСТВО:
ООО НПО «Гидротехпроект»
АДРЕС РЕДАКЦИИ:
г. Санкт-Петербург, 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

К вопросу о факторах схода ледника Колка в 2002 году А. Ф. Барановский, Э.В. Запорожченко…… 8

ГЛОБАЛЬНЫЕ И РЕГИОНАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИРОДЫ И КЛИМАТА 34

Роль различных факторов в арктическом усилении потепления климата В.Ф. Логинов…… 34

МЕТОДЫ, МОДЕЛИ И ТЕХНОЛОГИИ …… 59

Высокочастотный мониторинг и модели машинного обучения для оценки синоптической изменчивости стока взвешенных наносов малой городской реки С. Р. Чалов, В. М. Морейдо, И. С. Денисова, И. А. Солоников …… 59

Прочностные характеристики грунта при проектировании объектов лесной инфраструктуры А.Ю. Виноградов, О.В. Зубова…… 75

НАУЧНЫЕ ДИСКУССИИ…… 87

От редколлегии…… 87

Предложения к ГОСТ «Морские устья рек» Р.Я. Миньковская …… 89

Рецензия на статью Миньковской Р.Я. Предложения к ГОСТ «Морские устья рек» С.В. Лебедева…… 108

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ…….... 112

CONTENTS

HAZARDOUS PROCESSES IN THE HYDROSPHERE: FUNDAMENTAL AND ENGINEERING ASPECTS …… 8

On the issue of the factors of the collapse of the Kolka Glacier in 2002 8
Alexsandr. F. Baranovsky, Eduard.V. Zaporozhchenko ……..

GLOBAL AND REGIONAL CHANGES OF NATURE AND CLIMATE…… 34

The role of various factors in the arctic growth of climate warming 34
Vladimir F. Loginov ……

METHODS, MODELS AND TECHNOLOGIES…… 59

High-frequency monitoring and machine learning models for assessing synoptic variability of suspended sediment flow of a small urban river 59
Sergey R. Chalov, Vsevolod M. Moreido, Irina S. Denisova, Ivan A. Solonikov ……

Strength characteristics of soil in the design of forest infrastructure facilities 75
Alexey Yu. Vinogradov, Oksana V. Zubova ……

SCIENTIFIC DISCUSSIONS …… 87

From the Editorial Board ……... 87

Proposals to the State Standard "Marine estuaries" Rosa Ya Minkovskaya…….. 89

Review on the article by R.Ya. Minkovskaya Proposals to the State Standard "Marine estuaries" 108
Serafima V.Lebedeva ……..

AUTHORS GUIDELINE…… 112

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

УДК 551.2+551.23+551.24:551.3+551.324
DOI: 10.34753/HS.2023.5.1.8

К ВОПРОСУ О ФАКТОРАХ СХОДА ЛЕДНИКА КОЛКА В 2002 ГОДУ

А. Ф. Барановский, Э.В. Запорожченко

Селевая ассоциация, г. Пятигорск, Россия
baranovskiy24@mail.ru
ednad17@mail.ru

Аннотация. Выполнен анализ факторов, которые могли оказать влияние на катастрофическое развитие событий при сходе ледника Колка 20 сентября 2002 г. Основываясь на материалах многочисленных публикаций и приведенных в статье новых данных, авторы предлагают свою оценку и интерпретацию некоторых особенностей эндогенных и экзогенных процессов, происходивших в ущелье Колка. Выделены гравитационно-тектонические блоки в скальном массиве на правобережном склоне ледникового цирка Колка, к которым приурочены крупные обвалы льда и горных пород, наблюдавшиеся в 2002 г. Приведены доказательства эндогенной активности в долине р. Колка. Прослежены две системы разрывных нарушений, к пересечению которых приурочен участок проявления газовых извержений в днище ледникового цирка Колка. Установлено, что причиной формирования катастрофической ледово-каменной лавины в 2002 г. являются эндогенные факторы, а именно, взрыв газов и пара в тыловой части ледника Колка.

Ключевые слова: Геналдонская катастрофа; ледник Колка; ледово-каменная лавина; эндогенные и экзогенные процессы;

ON THE ISSUE OF THE FACTORS OF THE COLLAPSE OF THE KOLKA GLACIER IN 2002

Alexsandr F. Baranovsky,
Eduard V. Zaporozhchenko
Debris Flow Association, Pyatigorsk, Russia
baranovskiy24@mail.ru
ednad17@mail.ru

Abstract. The analysis of factors that could have influenced the catastrophic development of events during the descent of the Kolka glacier on September 20, 2002 was carried out. Based on numerous publications and the new data presented in the article, the authors offer their assessment and interpretation of some features of endogenous and exogenous processes occuring in the Kolka Gorge. Gravitational-tectonic blocks in the rock massif on the right-bank slope of the Kolka glacier cirque have been identified, which are associated with large collapses of ice and rocks observed in 2002. The evidence of endogenous activity in the Kolka River valley is presented. Two systems of discontinuous faults have been traced, the intersection of which is associated with the site of the manifestation of gas eruptions in the bottom of the Kolka glacier cirque. It has been established that the cause of the formation of a catastrophic ice-stone avalanche in 2002 is endogenous factors, namely, the explosion of gases and steam in the rear part of the Kolka glacier.

Keywords: Genaldon catastrophe; Kolka glacier; ice-stone avalanche; endogenous and exogenous processes; ice and rock collapses; gravitational-

Baranovsky A.F., Zaporozhchenko E.V. On the issue of the factors of the collapse of the Kolka glacier in 2002. *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2023, vol. 5, iss. 1, pp. 8–33. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2023.5.1.8.

гравитационно-тектонические блоки; активные тектонические зоны; газовые извержения.

tectonic blocks; active tectonic zones; gas eruptions.

Введение

Анализ обширной информации о леднике Колка и Геналдонской катастрофе 2002 г., а также представленные в статье новые данные, позволяют предложить свою точку зрения на некоторые аспекты формирования ледово-каменных лавин в бассейне р. Колка, которая является одним из истоков р. Геналдон и расположена в нивальной зоне Большого Кавказа (Республика Северная Осетия-Алания, рисунок 1).

[Котляков и др., 2014] сообщают о четырех известных случаях схода ледника Колка с выходом ледяных масс за пределы ущелья Колка: 1834–35, 1902, 1969–70 и 2002 гг.

При этом, в 1834–35 и 1969–70 гг. разгрузка ледника носила спокойный характер [Черноморец, Адцеев, 2014; Котляков и др., 2014]; в 1902 г. наблюдался смешанный тип движения, который сочетал в себе, как медленные подвижки льда, так и два катастрофических выброса; и, наконец, в сентябре 2002 г. произошел единовременный катастрофический выброс ледника Колка.

[Заалишвили, Невская, Харебов, 2014] по сейсмическим записям оценили скорости движения образовавшейся ледово-каменной массы в ущелье Колка в 2002 г. «Ледник Колка, достигший критической массы, под воздействием очередного обвала <…>, был буквально сдвинут со своего ложа. Далее ледник двинулся (заскользил) под воздействием гравитационной силы вниз по не особенно крутой поверхности со скоростью 70 км/ч. После удара о горные породы, сделав поворот у ледника Майли <…>, ледово-каменная масса понеслась вниз со средней скоростью 360 км/ч на водной (может быть, воздушно-водной) подушке». Далее по р. Геналдон прошёл, как известно, также высокоскоростной поток селевого сложнокомпонентного характера (вода, лёд, мелкозём, обломки и глыбы скальных пород) с катастрофическими последствиями – человеческими жертвами и инфраструктурными разрушениями в долинах рек Геналдон и Гизельдон.

Высокая скорость движения ледово-каменной массы стала предметом многочисленных дискуссий и гипотез. Большинство исследователей считают, что для развития такого рода события необходимо мощное внешнее воздействие на ледник.

Результаты

Основными факторами, которые могли в той или иной степени стать причинами Геналдонской катастрофы 2002 г. или повлиять на ее ход, являются климатический, эндогенный (сейсмический, тектонический, вулканогенный) и экзогенный (гравитационный, гляциальный).

Климатический фактор

Наиболее детально климатические условия рассмотрены в работе [Лебедева, Рототаева, 2005], основные выводы из которой приводятся ниже.

«Климатический фактор, а именно аномальное потепление климата в последнее десятилетие, вызванное появлением нового циркуляционного процесса – устойчивым выходом южных циклонов в Кавказский регион, играл значительную роль в преждевременной подвижке ледника Колка, так же, как и других известных природных катастроф на Кавказе – Герхожанском селе 2000 года, неожиданных наводнениях с разрушениями и жертвами в 2002 г., и т.д.».

«<…> баланс массы ледника имел очень небольшие положительные значения или даже был отрицательным. Но если критическая масса ледника не могла накопиться таким путем, то не исключено, что большую роль здесь сыграл другой процесс – необычный объем обрушений льда и горной породы в тыловой части ледника».

«В Казбек–Джимарайском районе <…> с середины 90-х годов происходило устойчивое повышение, как летних температур, так и годовой

суммы осадков. Впервые за 100 лет температура лета превышала норму 7 лет подряд, вплоть до геналдонской катастрофы осенью 2002 г. Одновременно увеличивалось количество атмосферных осадков».

«<…> за последние десятилетия обычно отрицательные средние летние температуры здесь, на высоте 4000 м сменились на положительные, доля жидких осадков увеличилась с нескольких процентов до 10–15% <…>. Таяние и сток усилились в 2–3 раза по сравнению с 1994 г., когда метеоусловия были близки к средней многолетней величине. Часть фирнового плато включилась в стокообразование. Отсюда следует, что в связи с усиленным таянием в течение почти десяти лет подряд прочность фирновых толщ ослабевала. <…> По-видимому, значительное усиление таяния способствовало интенсивным обвалам фирна, льда и горной породы <...>».

«Примечательно, что в год подвижки количество воды, образовавшейся в бассейне ледника Колка, было на 62% больше среднего значения. <…> Доля жидких осадков на высоте 3400 м достигла 40% годового количества общих атмосферных осадков, которые были самыми большими за более, чем 100 предшествующих лет».

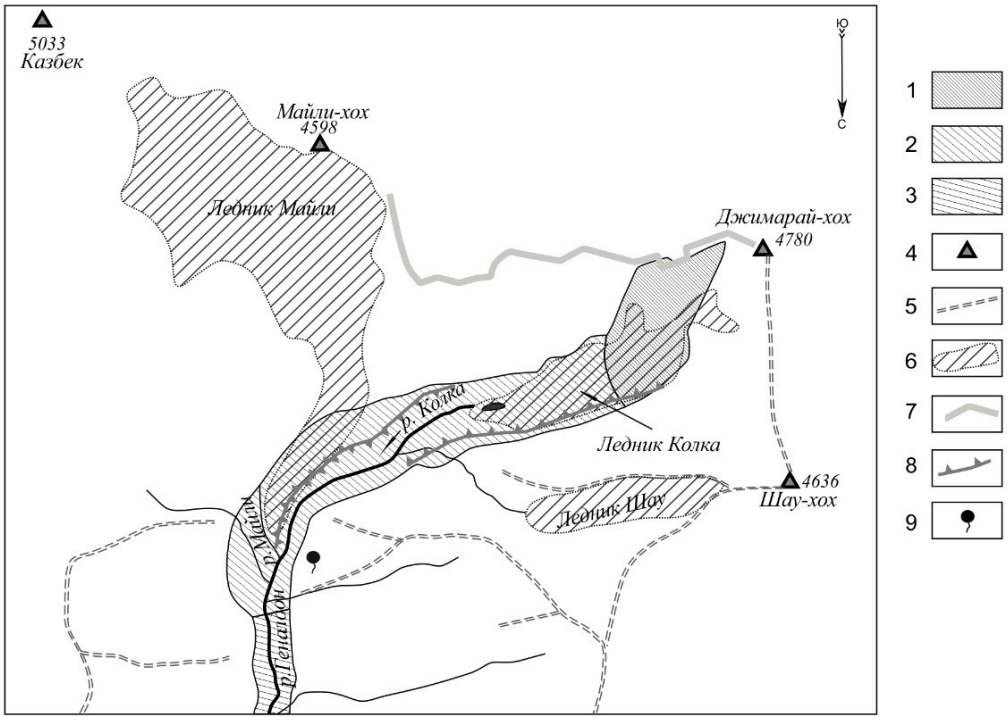


Рисунок 1. Обзорная схема бассейна р. Колка:
1 – зона фирново-каменно-ледовых обвалов; 2 – зона начального движения ледово-каменной массы; 3 – зона транзита ледово-каменного селя по р. Геналдон; 4 – горные вершины; 5 – горные хребты; 6 – ледники (в границах 2001 г.); 7 – участок висячих ледников; 8 – береговые морены ледников Колка и Майли; 9 – Верхне-Кармадонские минеральные источники.
(Схема составлена по материалам [Поповнин и др., 2003]).

Figure 1. Overview scheme of the Kolka River basin:
1 – zone of firn-stone-ice collapses; 2 – zone of initial movement of ice-stone mass; 3 – zone of transit of ice-rock mudflow along the Genaldon River; 4 – mountain peaks; 5 – mountain ranges; 6 – glaciers (within the boundaries of 2001); 7 – section of hanging glaciers; 8 – coastal moraines of the Kolka and Maili glaciers; 9 – Upper Karmadon mineral springs.
(The scheme is based on the materials [Popovnin et al., 2003]).

По мнению [Осокин, 2014], климатические условия способствовали накоплению воды в бассейне ледника, повышению температуры льда и грунта и понижению их устойчивости.

Добавим, что начало всех известных случаев схода ледника Колка приурочено к жарким летним месяцам либо сменяющему их сентябрю: в 1834/35 гг. – к августу [Черноморец, Адцеев, 2014, с. 341;], в 1902 г. – к июлю, в 1969/70 гг. и 2002 г. – к сентябрю. Кроме того, погодные условия и 1902, и 2002 гг., когда случались катастрофические выбросы лавин из ущелья Колка, характеризовались небывало большим количеством атмосферных осадков и аномально высокими температурами воздуха.

Как отмечают [Болов, Мочалов, Муратов, 2014а], в 1969 г. обвалы льда произошли уже после перехода средней суточной температуры воздуха через 0°С в сторону отрицательных значений в ледниковом бассейне. Это явилось основной причиной небольших скоростей вовлеченного в движение ледника и относительно ограниченной дальности выброса.

В отношении 1902 г. [Штебер, 1904] утверждает, что причиной обвалов стало не чрезмерное накопление льдов, а сильное таяние. В то же время инженер Попов в докладе от 23.10.1902 г. делает вывод, что катастрофические события 3 и 6 июля 1902 г. произошли «единственно по причине исключительно обильного в течение июня месяца выпадения снега» [Черноморец, Адцеев, 2014].

Сейсмический фактор

Данные о сейсмичности за 2002 г. приводятся в материалах [Поповнин и др., 2003; Котляков и др., 2014; Осокин, 2014; Заалишвили, Невская, Харебов, 2014].

По [Котляков и др., 2014], «Детальное исследование сейсмической обстановки в Северной Осетии в 2002 г., выполненное В.Н. Дробышевым по данным Геофизической службы РАН, показало, что самым сейсмически активным месяцем в этом году был июль: за 18 суток массив Джимарай-Хох испытал шесть сейсмических ударов. 14 июля произошло самое большое землетрясение: в эпицентре, который находился всего в 8 км к западу от вершины, сила подземного толчка достигала 5,2 баллов. В этот же день было еще два удара, оказавших воздействие на гору силой 2–3,5 балла. <…> По мнению В.Н. Дробышева, влияние землетрясений такой интенсивности на висячие фирновые поля над ледником Колка может вызвать их значительные механические повреждения, снизить устойчивость блоков горных пород на горе Джимарай-Хох на 9%. <…> В то же время выброс самого ледника, как показало изучение сейсмограмм, сопровождающих этот процесс, не был вызван землетрясением в данном районе».

«В 20 час. 08 мин. 30 сек. <…> включились сразу все окружающие станции, что <…> (Заалишвили и др., 2004, 2014) связали с предшествующим сходу ледника событием <…>».

По [Осокин, 2014] «Предварительный анализ записей окружающих сейсмостанций показал, что удаленные и местные землетрясения могли вызывать многочисленные обвалы вплоть до 20 сентября 2002 г. Но изучение сейсмограмм самого схода ледника показало, что этот процесс был вызван не землетрясением (Заалишвили и др., 2004, 2005). При этом на графиках, отражающих моменты наибольшего выделения энергии, начальный импульс включения станций почти не выражен, в отличие от следующего, который интерпретируется как удар ледника в правый борт на повороте долины ниже языка Майли. Но максимальный пик энергии с серией последующих волн совпадает с ударом ледовой массы о стену Скалистого хребта».

По [Поповнин и др., 2003] «Расшифровка сейсмограмм от 20 сентября свидетельствует о том, что фокус начального сигнала, зарегистрированного в 20 ч 08 мин, располагался вблизи дневной поверхности. Тогда логично заключить, что толчок в 20 ч 08 мин был не причиной обвала льда, а его следствием, возможно, результатом удара низвергнутого ледяного массива о долинную часть ледника Колка и левобережную морену. Это является аргументом в пользу гипотезы о единовременном обрушении значительного по объему ледяного тела».

Вместе с тем, [Заалишвили, Невская, Харебов, 2014] считают, что «очередное событие за 12 минут до начала процесса схода (взрыв/землетрясение) было зарегистрировано двумя станциями Геофизического центра экспериментальной диагностики (ГФЦЭД) и одной АО «Институт Гидропроект» и, очевидно, могло раскачать тело висячего ледника. Произошел обвал висячего ледника. Ледник Колка, достигший критической массы, под

воздействием очередного обвала (именно он обусловил включение сейсмических станций локальной сети ГФЦЭД, но не был записан), был буквально сдвинут со своего ложа за несколько секунд до метки 1», соответствующей началу отсчета времени движения каменно-ледовой массы».

Здесь также уместно упомянуть авторитетное мнение этих же авторов [Заалишвили, Невская, Харебов, 2014] о работе сеймостанций. «Особо необходимо отметить неудовлетворительно организованную службу времени на всех станциях локальной сети на период схода ледника. Это значительно усложнило обработку данных и повысило величину погрешности. Кроме того, сеть характеризовалась на период схода ледника неудовлетворительной подборкой параметров срабатывания триггеров, нередко приводящей к отсутствию на записях землетрясений первых вступлений и т.д.».

Приведенные данные говорят о возможном влиянии сейсмических событий на активизацию обвального процесса, но не дают однозначного ответа, был ли сейсмический фактор триггером крупных обвалов на ледник Колка.

Тектонический фактор

Многие авторы считают, что неотектонические движения являлись составной частью суммы факторов, инициировавших сход ледника Колка в 2002 г.

В частности, [Котляков и др., 2014] отмечают: «Развитию обвалов способствовали новые тектонические подвижки вдоль линий омоложенных разломов в теле вулканического массива, а также землетрясения», «Ледник Колка находится на пересечении двух разломов – крупного субширотного, на котором расположена долина Колки, и субмеридионального, проходящего в тыловой части ледника».

На фотографии И.М. Васькова [Васьков, 2016], снятой в августе 2003 года при максимальном освобождении северного склона ледникового цирка от снега и льда, в пределах пачки сильно трещиноватых вулканогенно-осадочных пород, отчетливо фиксируется система крутопадающих трещин отседания, ориентированных вдоль правобережного гребня долины Колка (рисунок 2). Угол падения трещин, судя по рисунку 2, составляет около 60-70°. По этим трещинам происходит отделение от коренного массива крупных плитообразных блоков протяженностью до нескольких сотен метров, образование которых должно быть связано как с гравитационным отседанием склона, так и с тектоникой. Плоскости таких же трещин в виде крутых скальных уступов прослеживаются и далее на восток на северном склоне долины Колка.

Наблюдавшаяся в 2001 г. и особенно в 2002 г. высокая активность обвалов свидетельствует о быстрой деградации и разрушении гравитационно-тектонических блоков пород, что в свою очередь могло стать одной из основных причин падения висячих ледников, начавшегося за 2 месяца до катастрофы. Именно к такому блоку, в его западной части, приурочен участок развития наиболее масштабного многофазного обвала горных пород и льда, расположенный над тыловой частью ледника Колка.

В зоне интенсивных обвалов также выделяются и другие системы крутопадающих трещин, которые являются секущими по отношению к трещинам отседания и, вероятно, связаны с тектоникой. Плоскость одной из таких трещин ограничивает с запада участок интенсивных обвалов и заложена вдоль контакта между сильно трещиноватыми породами вулканогенно-осадочной толщи, развитыми на северном склоне ледникового цирка, и массивными породами, слагающими северо-восточный склон Джимарай-хоха (рисунок 2). На геологической карте листа К-38-IX масштаба 1:200 000 (ПГО «Севкавгеология», А.Н. Губкин, В.А. Ермаков, 1984г.) на правобережье ущелья, в тыловой части ледника Колка фрагментарно показаны выходы вулканогенно-осадочных пород нижней подсвиты кистинской свиты нижней юры (J_1ks). На левом борту ущелья Колка, в верховьях долины, обнажаются породы карбонатной толщи гизельдонской свиты нижней-верхней перми (известняки, мраморы) ($P_{1-2}gz$).

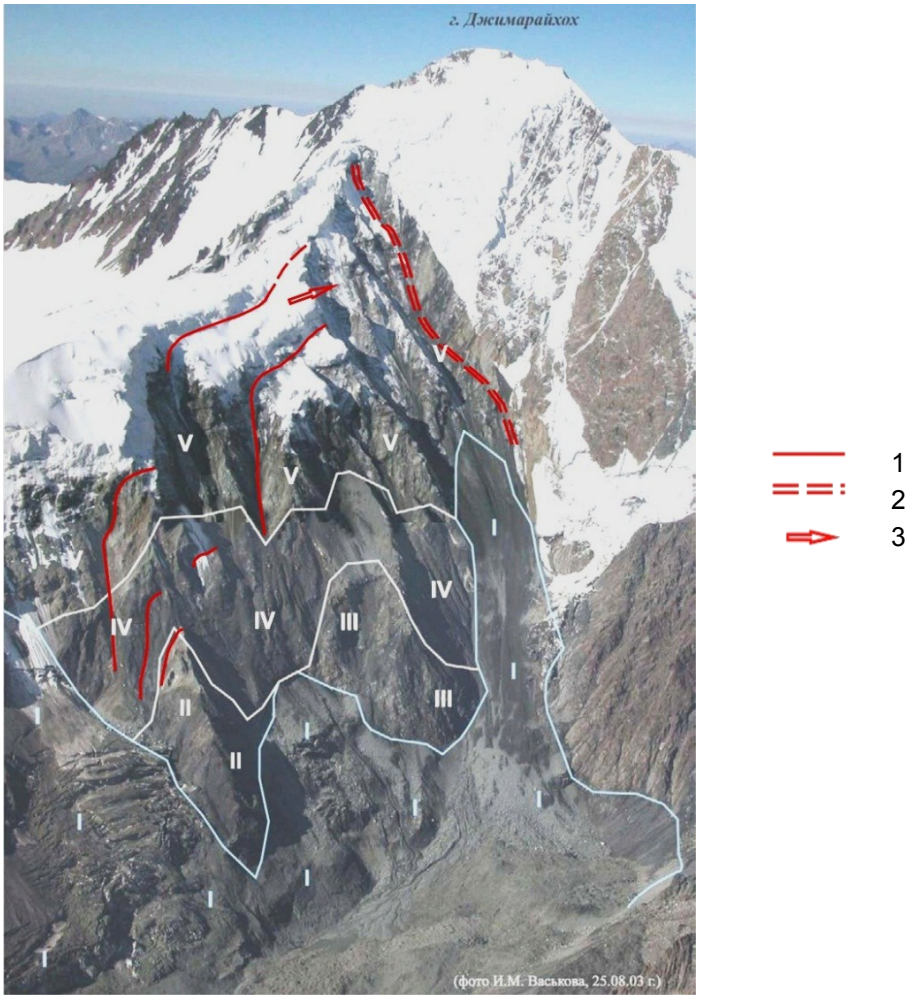


Рисунок 2. Зона обвала с восточного гребня горы Джимарай-хох в августе 2003 г.:
1 – трещины оседания, 2 – линия контакта, ограничивающего с запада толщу сильно трещиноватых вулканогенно-осадочных пород, 3 – участок формирования многофазного обвала в 2002 г.
В основании склона лежат ледники, закрытые с поверхности чехлом обломочного материала (I), лавы и силлы долеритов (II), прорванные штоками гранодиритов (III), которые перекрываются пачкой графитизированных сланцев (IV), выше залегают вулканогенно-осадочные породы (V), которые венчаются ледово-фирновыми полями (По данным [Васьков, 2016]. Фото И.М. Васькова, 25.08.2003).

Figure 2. The collapse zone from the eastern ridge of Jimaraikhoh in August 2003:
1 – settlement cracks, 2 – the contact line limiting the thickness of highly fissured volcano-sedimentary rocks to the west, 3 - the area of the formation of a multiphase landslide in 2002.
At the base of the slope are glaciers closed from the surface by a cover of detrital material (I), lava and sills of dolerites (II), broken by granodyrite rods (III), which are overlapped by a pack of graphitized shales (IV), volcanogenic sedimentary rocks (V) lie above, which are crowned by ice-firn fields (According to [Vaskov, 2016]. Photo by I.M. Vaskov, August 25, 2003).

Развитие в пределах площади обвалов тектонически нарушенных пород подтверждается в работе [Лохов, Полквой, 2010].

По данным [Гурбанов, 2014] одним из критериев оценки современного состояния Казбекского вулканического центра является «<…> интенсивное таяние ледников и снежников только в пределах контуров, выявленных дистанционными методами устойчивых положительных тепловых аномалий <…>». В связи с этим отметим, что тепловые потоки, как правило, приурочены к разрывным тектоническим нарушениям с повышенной проницаемостью (трещиноватостью) горных

пород, что характерно для участка активизации обвалов на правобережном склоне ледникового цирка Колка.

Наличие тектонических и гравитационно-тектонических трещин, интенсивное разрушение блоков отседания с резкой активизацией обвальных процессов свидетельствуют о возможном проявлении неотектонических движений, с которыми связана и сейсмическая активность в районе Джимарай-хоха. Вполне вероятно, что максимальное развитие обвалов приурочено к участку пересечения оперяющих трещин субширотного разлома, проходящего вдоль долины Колка, с поперечной меридиональной тектонической зоной. Во всяком случае, формирование гравитационно-тектонических блоков, а также быстрое их разрушение в 2001–2002 гг. на относительно небольшом интервале невозможно объяснить только физическим выветриванием горных пород и оттаиванием многолетнемерзлых пород в криогенной зоне.

Вулканогенный фактор

Версия о том, что сход ледника Колка в 2002 г. связан с активностью магматического очага Казбекского вулканического центра и постмагматическими процессами имеет немало сторонников, среди которых в первую очередь следует назвать М.Г. Бергера, В.М. Котлякова, Я.Д. Муравьева.

По [Муравьев, 2014] «<…> выходы углекислых вод вокруг подножья горы являются косвенным доказательством деятельности магматического очага Казбекского вулканического массива».

«<…> предполагается, что на тыльном участке Колкинского цирка, который «сидит» на трещиноватой зоне глубинного разлома широтного простирания благодаря огромной глубине эрозионного вреза, по-видимому, зона трещиноватости вскрыла кровлю гидротермальной системы, имеющей в качестве источника тепла одну из неоинтрузий г. Джимарай-хох или магматическую камеру (очаг) вулкана Казбек».

[Гурбанов, 2014], рассматривая критерии оценки современного состояния Казбекского вулканического центра, указывает на «наличие современных приповерхностных магматических камер и питающего их глубинного очага с расплавом, выявленных дистанционными и геофизическими методами исследований».

Основным аргументом, высказанным многими авторами в обоснование проявления постмагматических процессов в ущелье Колка в 2002 г., является формирование газопылевого или парогазового облака, которое наблюдалось в ледниковом цирке после схода ледника.

В пользу этой версии могут свидетельствовать расположенные всего в 5 км ниже тыловой части ледника Колка Верхне-Кармадонские геотермальные минеральные источники с температурой на выходе на дневную поверхность до 55^0 С [Котляков и др., 2014].

Как отмечает Р.А. Тавасиев, на всех фотографиях, в том числе и на снимке, сделанном в начале сентября 2002 г., видны клубящиеся облака, возникающие при обвалах с висячих ледников. Там же говорится и о грязевых подтеках, которые видны на всех аэрофотографиях сентября 2002 г. [Тавасиев, 2014]. Аналогичные сведения приводят В.М. Котляков и соавторы [Котляков и др., 2014]. Об устойчивых султанах фумарол, плотном парогазовом облаке, стелившемся над ложем ушедшего ледника и стекавшем вниз по долине, как и о следах талых вод из-под висячих ледников, пишет и Я.Д. Муравьев [Муравьев, 2014].

На видеоматериалах, снятых на следующий день после катастрофы, утром 21 сентября 2002 г. (Дробышев В.Н.)[1], в верховьях долины Колка видны два облака.

Одно облако невысокой плотности просматривается над зоной транзита обвалов и, как считает [Тавасиев, 2014], вероятно, связано с обвалами, формирующимися в верхней части правобережного склона ледникового цирка Колка. При этом, непосредственно в зоне зарождения обвалов облака отсутствуют.

Второе плотное белое облако, о котором упоминает [Муравьев, 2014], узкой длинной

[1] Гляциальная катастрофа в Северной Осетии 20 сентября 2002 г. / Видеофильм. Владикавказ: «Севосэко», 2003.

полосой протягивается практически на одной и той же высоте над ложем ледника Колка вдоль левой боковой морены. Наибольшая плотность облака отмечается в тыловой части ледника, где оно заполняет всю котловину ледникового цирка.

На фотографиях Г.А. Долгова, снятых днем 21.09.2002 [Васьков, 2016], и И.В. Галушкина от 25.09.2002 [Котляков и др., 2014] в ледниковом цирке, у подножия правобережного склона, с которого происходили интенсивные обвалы, фиксируется то же облако, но гораздо меньших размеров. Именно это обстоятельство позволило многим исследователям предположить, что облако состоит из пыли и связано с масштабными обвалами льда и горных пород.

В отношении грязевых подтеков или следов талых вод, надо сказать, что они больше соответствуют обвально-осыпным шлейфам, приуроченных к участкам развития сильно трещиноватых горных пород. В том числе, активизации обвально-осыпных процессов и образованию подтеков способствовало оттаивание льда, цементирующего дезинтегрированные породы в криогенной зоне.

Также в некоторых материалах есть упоминания о большом углублении, обнажившемся в днище ледникового цирка Колка после схода ледника 20 сентября 2002 г.

В работе [Котляков и др., 2014] отмечено следующее. «По мнению М.Г. Бергера, при газодинамическом выбросе ледника произошел «высокоскоростной разлет продуктов его разрушения», «метание обломков» «вверх и в стороны от эпицентра выброса» <…>. Кроме того, в цирке образовалась «гигантская воронка выброса», на выходе газоподводящего канала возникло «воронкообразное (мульдообразное) расширение с диаметром в сотни метров».

Однако на пустом ложе ледника не было ничего похожего на «гигантскую воронку выброса», это видно на всех снимках и подтверждено при наземных обследованиях цирка. Нет также никаких признаков «разлета обломочного материала».

По сведениям [Носов, Сейнова, Запорожченко, 2007] «Обвалы начались за два месяца до катастрофы. <…> Заключительный удар оставил после себя яму выбивания глубиной в 60 м и ледово-каменные заплески».

К сожалению, более подробной информации о таинственной огромной воронке нам найти не удалось.

На фотографии Г.А. Носенко, сделанной в сентябре 2003 г. [Котляков и др., 2014, рисунок 65] в районе наблюдавшегося парогазового облака, на днище долины, где находилась тыловая часть ледника Колка, действительно просматривается довольно большое воронкообразное углубление, частично засыпанное коллювиальными отложениями. Еще на одной фотографии, снятой И.В. Галушкиным 25 сентября 2002 г. [Котляков и др., 2014, рисунок 51] виден нижний край этого углубления с крутыми, почти отвесными бортами, высота которых, по нашему мнению, составляет не менее 10 м.

В итоге, авторами настоящей статьи на космическом снимке Google от 25.09.2002 (по счастливой случайности, сделанном в солнечную погоду и не закрытом парогазовым облаком), в ложе ледника, было установлено вытянутое вдоль долины р. Колка углубление (ниша) с четко очерченными границами. Более того, на дне углубления удалось распознать признаки газовых извержений с воронками взрыва (рисунок 3).

Новообразованное углубление (ниша) находится в днище ледникового цирка Колка, под тыловой частью сорванного со своего ложа ледника Колка. Оно имеет форму не овальной воронки, а изогнутого прямоугольника, стороны которого вероятно повторяют направление двух пересекающихся крутопадающих тектонических нарушений, ориентированных в субширотном (восток-северо-восточном) и меридиональном направлении.

По космическому снимку нам не удалось точно определить, чем сложено дно углубления. Предполагается, что его верхняя и средняя части представлены погребенными льдами, а нижний участок – коренными породами.

С использованием масштабной линейки космоснимка определены ориентировочные размеры ниши. Ее средняя длина составила 370 м, ширина – 130 м. Приняв среднюю глубину равной 10 м, получим объем 480000 м^3.

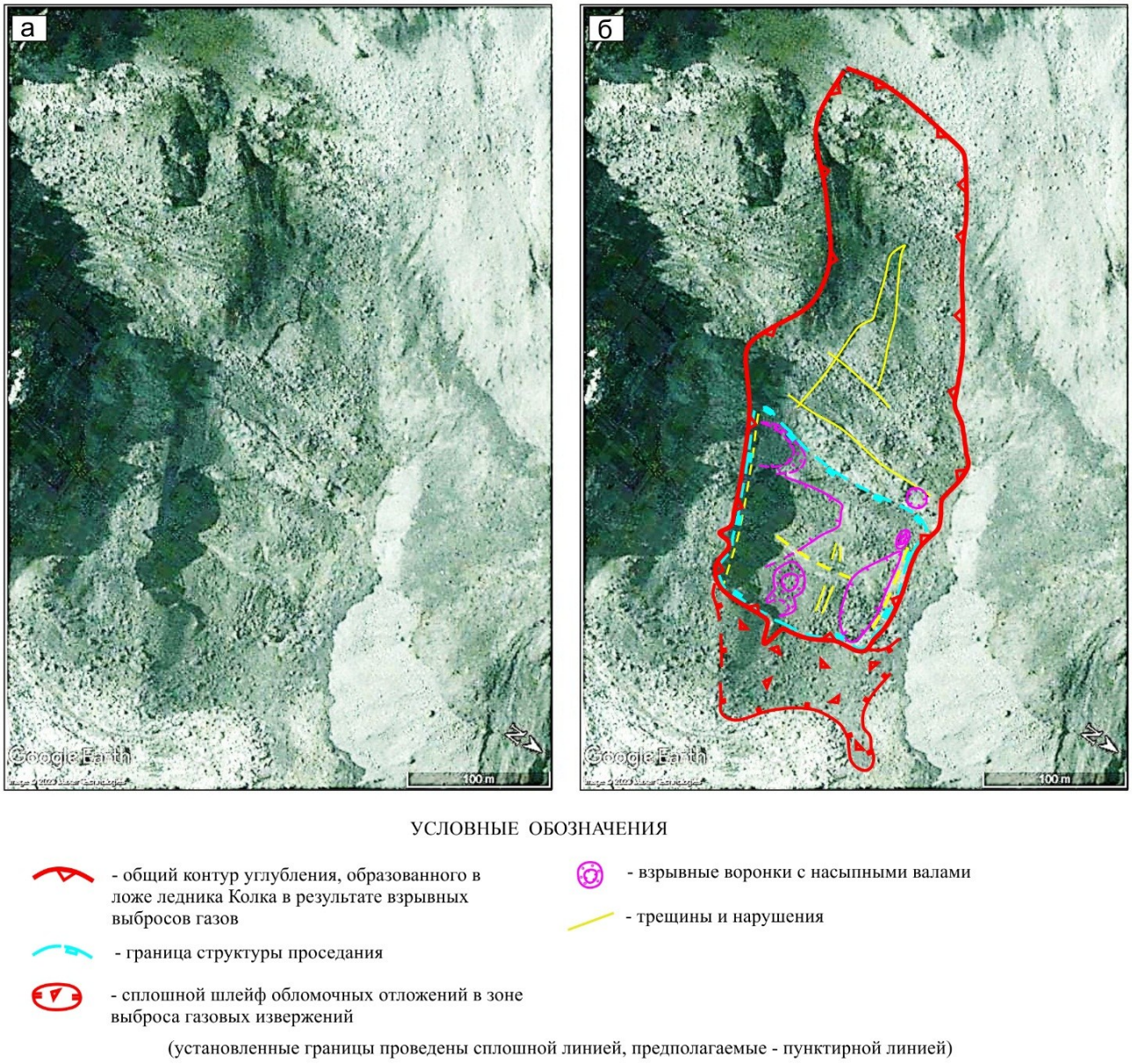


Рисунок 3. Участок проявления эндогенных процессов в днище долины р. Колка: а) фрагмент космического снимка Google от 25.09.2002; б) фрагмент того же космического снимка с данными интерпретации форм рельефа, сформировавшихся в результате деятельности неотектоники и газовых извержений.

Выбранная ориентировка космического снимка на рисунке 3 по отношению к сторонам света и горизонту продиктована необходимостью получения максимально отчетливого изображения рельефа. Местоположение этого участка показано на рисунках 4б и 5б.

Figure 3. The site of the manifestation of endogenous processes in the bottom of the valley of the Kolka River: a) a fragment of a Google satellite image from September 25, 2002; b) a fragment of the same satellite image with data on the interpretation of landforms formed as a result of neotectonics and gas eruptions. The chosen orientation of the satellite image in Figure 3 in relation to the cardinal directions and the horizon is dictated by the need to obtain the most distinct image of the relief. The location of this section is shown in Figures 4b and 5b.

Наибольшая глубина фиксируется в нижней (восточной) части ниши, где был проявлен процесс газовых извержений, с которым, вероятно, связано формирование структуры

проседания за счет выброса при взрывах раздробленных горных пород. Не исключено, что газовые извержения происходили в несколько стадий.

Диаметр взрывных воронок достигает 75 м. Воронки имеют форму кольца, полукольца, вытянутого овала и нередко обрамляются насыпными валами из обломков горных пород.

Кроме того, установлены трещины субширотного и субмеридионального простирания, которые могут представлять собой как трещины ледника, так и проявление неотектоники.

К восточной границе ниши примыкает хорошо видимый на поверхности земли шлейф шириной 50–75 м, состоящий из отложений выброшенного при взрывах обломочного материала. Как известно, вулканические извержения состоят из нескольких последовательно развивающихся фаз и начинаются с подземного гула и подземных толчков, сотрясения почвы в окрестностях, которые могут быть вызваны движением магмы в очаге, взрывными выбросами газов и паров, образованием разрывов в верхних горизонтах земной коры. Далее следует серия мощных взрывов, освобождающихся из магмы газов с одновременным выбросом в атмосферу распыленных частиц лавы и раздробленных взрывом горных пород, после которых начинается излияние лавы.

В материалах [Котляков и др., 2014] приводятся следующие сведения: «Л.В. Десинов отмечает интересное событие в 2 часа ночи 20 сентября. В это время за гребнем хребта, ограничивающего ледник Колка слева, в 2 км к северу от него, трое ночевавших охотников были разбужены сильным толчком и содроганием земли, что сопровождалось мощным гулом».

Основываясь на этих данных, можно предположить, что взрывы газов, в том числе вечером 20 сентября 2002 г., были связаны не с постмагматическими процессами, а с проявлением тектономагматической активности. То есть, в долине Колка установлены две из трех фаз вулканического цикла – подземный толчок и извержение газов, с выбросом раздробленных горных пород. Надо полагать, что более детальную оценку этих событий выскажут специалисты в области вулканологии. Например, не исключено, что «накопления значительного количества природных газов под ледником», взрыв которых привел к «внезапному газодинамическому выбросу ледника Колка 20 сентября 2002 г.» [Бергер, 2006], могло и не быть. То есть, вечером 20 сентября 2002 г., по-видимому, произошел не подледный, а подземный взрыв, результатом которого стало образование огромной ниши в днище долины Колка.

Таким образом, вероятнее всего, начальный этап газовых извержений ознаменовался сильнейшим взрывом, сорвавшим с ложа и выбросившим вниз по долине ледник Колка и вызвавшим землетрясение, зарегистрированное в 20 час. 08 мин. 30 сек. всеми окружающими станциями, эпицентр которого располагался вблизи земной поверхности.

Фактор гравитационных процессов

Деятельность гравитационных процессов, а именно, обвалов льда, фирна и горных пород в ледниковом цирке Колка, рассмотрим с двух позиций.

Первое – это формирование в результате обвалов огромного конуса выноса на поверхности ледника Колка, что привело к набору ледником критической массы.

Как отмечают Х.О. Чотчаев и И.М. Малиев, «за период с 1985 по 2000 г. ледник потерял 15 м своей мощности, а через два года к моменту схода лед перевалил через левую морену, т.е. увеличил свою мощность более чем в 2,5–3 раза за счет обвальных масс висячих ледников» [Чотчаев, Малиев, 2014].

В.М. Котляков и соавторы также говорят о том, что «В результате необычно активных обвалов на поверхности ледника сформировался мощный конус выноса» [Котляков и др., 2014].

Р.А. Тавасиев считает, что «из-за обвалов висячих ледников № 8, 9 и 10 всего за три-четыре недели ледник Колка набрал критическую массу» и делает следующий вывод: «повышение поверхности этого ледника до уровня гребня левой береговой морены и заброс обломочного материала за нее является важным индикатором

набора ледником критической массы и приближающейся подвижки» [Тавасиев, 2014].

Второе – это влияние обвалов непосредственно на сход ледника Колка 20 сентября 2002 г., где обвалы могли сыграть роль триггера. Мнения по этому поводу разделились.

Большинство авторов публикаций (А.П. Полквой, Э.В. Запорожченко, И.М. Васьков, О.В. Тутубалина, В.Б. Заалишвили, В.Р. Болов и многие другие) относили обвалы к одной из главных причин схода ледника Колка 20 сентября 2002 г.

И.М. Васьков после проведения аэровизуальных наблюдений сообщает: «21 сентября в 8 часов утра с вертолета были обследованы долины рек Гизельдон и Геналдон <…>. При этом было зафиксировано продолжение обрушения льда и горных пород со склона восточного гребня вершины Джимарай-хох, а также изменения его (склона) морфологии в сторону выполаживания. Этот факт позволил сделать обоснованное предположение об обвальном происхождении Геналдонской катастрофы» [Васьков и др., 2022].

В первом после схода ледника научном описании [Запорожченко, 2003а] утверждается что: «Отмеченный сейсмический толчок в 20 часов 08 мин. 20.09.02 явился следствием единовременного обрушения значительного по объему ледового тела с большой высоты. Можно считать вполне достоверно установленным, что произошло это с участка примыкания фирново-ледовой перемычки (хребта) Майли-Джимарай-хох к северным склонам Джимарай-хоха».

По данным [Тутубалина, Черноморец, Петраков, 2005] «установлено, что резкая активизация обвалов с северного склона г. Джимарай-хох произошла в конце июля – первой половине августа 2002 г. Обвалы льда с висячих ледников практически завершились к 20 сентября, скальные обвалы продолжались длительное время после катастрофы».

«На снимке 20 сентября фиксируется крупный обвал, лежащий поверх свежего снега, площадью 0,17 км^2».

«Один из таких обвалов вечером 20 сентября 2002 г. мог послужить импульсом к началу катастрофы».

По оценке В.Р. Болова и соавторов, в 20 ч 09 мин. 20.09.2002 г. единовременный обвал фирново-ледовых толщ и скальных грунтов массой примерно $10{,}5 \times 10^6$ т, средней плотностью 1,3 т/м^3, рухнувших с высоты примерно 1000 м, выбил почти ¾ объема ледника Колка [Болов, Мочалов, Муратов, 2014б].

В то же время, В.М. Котляков и соавторы отмечают: «<…> правый склон цирка, который был подвержен обвалам, хотя и очень крут (в среднем 35^0), но имеет резко расчлененный рельеф <…>. Глыбы фирново-ледовых обвалов (как и куски горной породы) падают не на ледник, а на этот склон, разбиваясь на множество все более мелких обломков, и рассыпаются по поверхности ледника широким шлейфом» [Котляков и др., 2014].

С мнением В.М. Котлякова нельзя не согласиться, но при этом необходимо учитывать, что обвалы могли достигать массы в сотни тысяч и миллионы тонн и, как установлено [Тутубалина, Черноморец, Петраков, 2005], перехлестывали через весь ледник и его левую береговую морену. Таким образом, во время обвалов огромная масса льда и горных пород в любом случае оказывала сильное механическое воздействие на ледник. Кроме того, по данным И.М. Васькова [Васьков, 2016], уклон поверхности в зоне обвала достигал 59°, при среднем значении 41°.

Я.Д. Муравьев приводит следующие данные: «При перепаде высоты на этом участке склона ~ 900–1000 м и угле падения – 40° скорость фирново-ледовой лавины на выходе к леднику Колка, на дне ущелья, может превышать 75–80 м/с. <…> Предполагается, что лавина прокатилась по леднику, вызвав многочисленные сотрясения в его теле, которые способствовали резкому уменьшению фрикционных сил на большой площади ложа («отлипанию»)» [Муравьев, 2014].

По сведениям И.М. Васькова, общая длина обвального участка на момент схода ледника составила около 1 км: «20 сентября произошла основная фаза обвала, а в период после 20.09.02 г. до августа 2004 г. его зона в верхней части расширилась на восток до 2,5 км» [Васьков, 2016].

Протяженность зоны наиболее интенсивных обвалов горных пород и льда на

правом борту ледникового цирка Колка в августе–сентябре 2002 г. составила по гребню порядка 500 – 600 м. Именно на этом участке произошло обрушение в августе–сентябре 2002 г. ледников, которые по данным [Тавасиев, 2014] учтены под номерами 8, 9, 10.

Для оценки масштабов обвального процесса сравним две пары космических снимков, представленных рисунками 4 и 5.

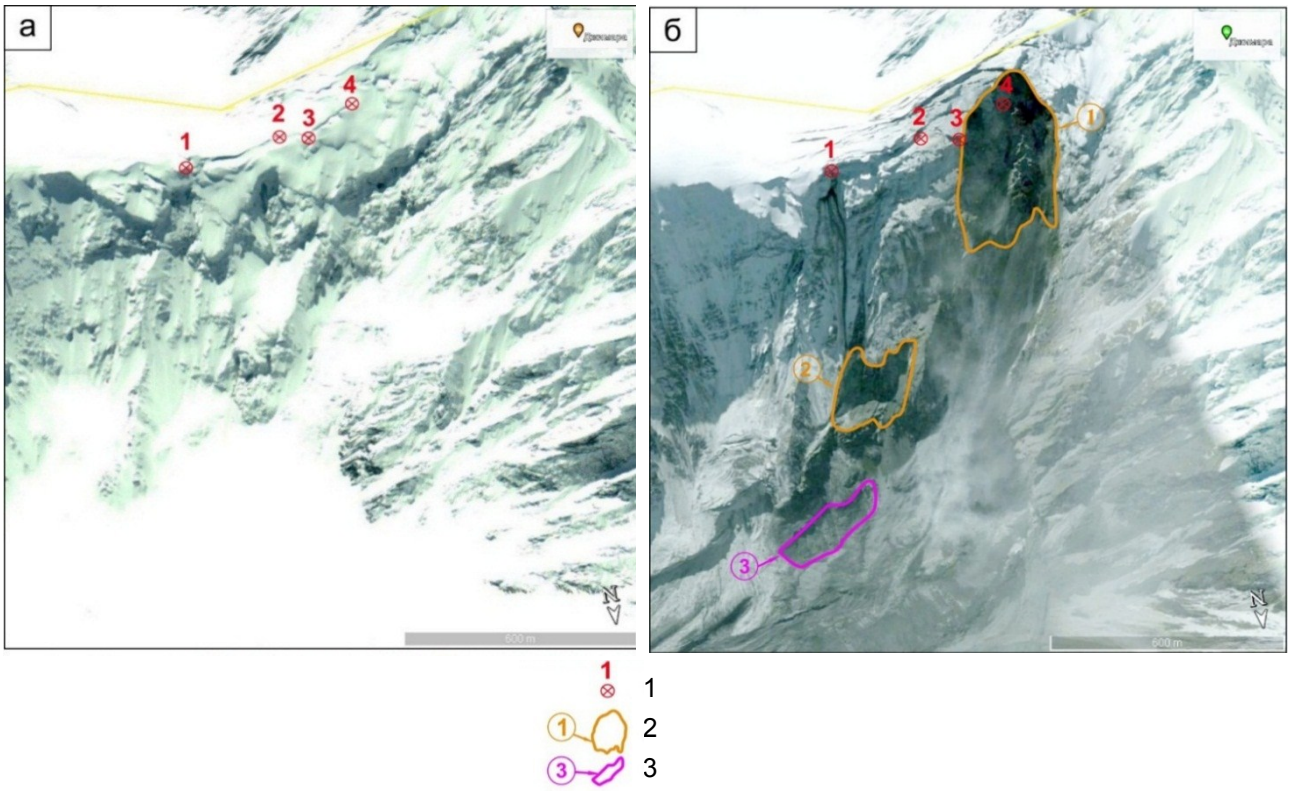


Рисунок 4. Правый борт ледникового цирка Колка с максимальным развитием гравитационных процессов в августе–сентябре 2002 г.: а) по состоянию на 29.04.2002; б) по состоянию на 25.09.2002 (перспективное изображение космических снимков Google):
1 – точки, фиксирующие линию отрыва льда, 2 – границы и номера участков активных обвалов, 3 – граница углубления, образовавшегося в результате газовых извержений в ложе ледника Колка

Figure 4. The starboard side of the Kolka glacier cirque with the maximum development of gravitational processes in August–September 2002: a) as of April 29, 2002; b) as of September 25, 2002 (perspective image of Google satellite images):
1 – points that mark the line of ice detachment, 2 – boundaries and numbers of active landslide sections, 3 – the boundary of the depression formed as a result of gas eruptions in the bed of the Kolka glacier.

На рисунке 4 с перспективным изображением космической съемки показан участок максимального развития обвалов в августе–сентябре 2002 г. на правобережном склоне ледникового цирка Колка по состоянию на 29.04.2002 г. (рисунок 4а) и 25.09.2002 г. (рисунок 4б).

На рисунке 4а видно, что уже в апреле 2002 г. на гребне существовала линия отрыва льда, которая фиксируется отчетливым непрерывным уступом протяженностью около 500 м. Ниже по склону также четко просматривается нижняя граница ледника, мощность которого могла достигать 80 м [Поповнин и др., 2003].

При сравнении точек 1, 2, 3, 4 на рисунках 4а и 4б, становится очевидным, что к 25 сентября обрушилась практически вся масса льда и фирна, находящаяся ниже линии отрыва и нависавшая сплошным массивом над тыловой частью ледника Колка. Кроме того, зона обрушения льда расширилась на запад от точки 4 приблизительно на 150 м.

Образование ледового уступа, так же, как и гравитационно-тектонических блоков горных пород, вероятнее всего, связано с геологическими процессами.

На рисунке 4б по темному фототону выделяются две крупные обвальные ниши, приуроченные к участку гравитационного отседания склона. Первая из них, овальной формы, отражает зону формирования (зарождения) наиболее масштабного многофазного обвала и находится в верхней пригребневой части правого борта ледникового цирка, а вторая, меньших размеров, расположена ниже и имеет угловатые контуры.

Сравним далее два плановых космических снимка (рисунок 5), один из которых был сделан за 8,5 часов до схода ледника – 20.09.2002 г. [Тутубалина, Черноморец, Петраков, 2005] (рисунок 5а), а второй через 5 дней – 25.09.2022 г. (рисунок 5б). В момент съемки, Солнце в обоих случаях находилось на юго-востоке.

Нижняя обвальная ниша на рисунках 5а и 5б имеет практически одинаковые очертания, следовательно, основной обвальный процесс здесь произошел до схода ледника Колка. В то же время, верхний обвальный участок на снимке от 25.09.2002 г. (рисунок 5б) значительно изменил и расширил свои контуры. При этом, по рисунку 4б видно, что западная сторона верхнего обвала освещена солнцем, границы обвала по всему периметру четкие и не вызывают сомнений.

Таким образом, в интервале времени от момента съемки, сделанной днем 20 сентября 2002 г., незадолго до катастрофы, и до 25 сентября 2002 г. на верхнем обвальном участке произошла достаточно сильная активизация гравитационных процессов.

Используя масштабную линейку космоснимка, рассчитаем ориентировочный объем и массу возможного единовременного обвала горных пород и льда. Для расчета приняты следующие параметры всей верхней обвальной ниши: средняя ширина – 250 м, протяженность вниз по склону – 430 м, ориентировочная мощность – 30 м, объем – 3225000 м^3. Условимся, что в обвалах участвовало равное количество горной породы и льда, тогда при средней объемной массе вулканогенно-осадочных пород 2,5 т/м^3 и льда 1 т/м^3, и небольшом округлении объема до 3,2 млн. м^3, масса всего обвального участка составит: 1600000 м^3 × 2,5 т/м^3 + 1600000 м^3 × 1 т/м^3 = 4000000 т + 1600000 т = 5600000 т. Учитывая, что обвалы на этом участке происходили и ранее, максимальный объем единовременного обвала, вероятно, не мог превысить третьей части всего объема обвальной ниши, тогда его масса составит около 1,9 млн. т.

О.В. Тутубалина и соавторы установили, что накануне катастрофы произошел крупный обвал, отложения которого покрыли площадь в 0,17 км^2 [Тутубалина, Черноморец, Петраков, 2005]. При вполне допустимой средней мощности обвальных отложений 1 м, объем обвала составит 170000 м^3, а масса – порядка 300 тыс. т.

Таким образом, крупные обвалы в сотни тысяч и миллионы тонн могли сыграть роль триггера при разгрузке набравшего критическую массу ледника Колка в 2002 г., но такой ход событий был нарушен внезапно произошедшим мощным газовым взрывом.

В.Р. Болов, В.П. Мочалов и Ш.С. Муратов считают, что обвалы с обрамляющих склонов стали главной причиной схода ледника Колка в 1902 и 1969 гг. [Болов, Мочалов, Муратов, 2014а].

Что касается событий 1902 года, то доказательством сильной активности обвалов служат слова Э.А. Штебера: «3-го июля <…> сорвался весь, накопившийся в течение многих лет, фирновый лед, накопившийся в виде пяти ледяных потоков на северном склоне хребта Майли. Вся эта масса льда покатилась на ледник Колка, затем, ударившись о заграждавший выход из ущелья ледник Майли, повернула в ущелье Геналдон. <…> первым упал, как это видно по полосам на обвале в ущелье Колка, ближайший к выходу, спускающийся ниже всех фирнглетчер <…>, а за ним, может быть, от одного сотрясения почвы и воздуха стали постепенно падать подготовленные уже к падению четыре следующие ледника. Последними упали 6-го июля фирнглетчеры Гимарай-хоха и хребта Колка, имевшие самую высокую точку опоры» [Штебер, 1904].

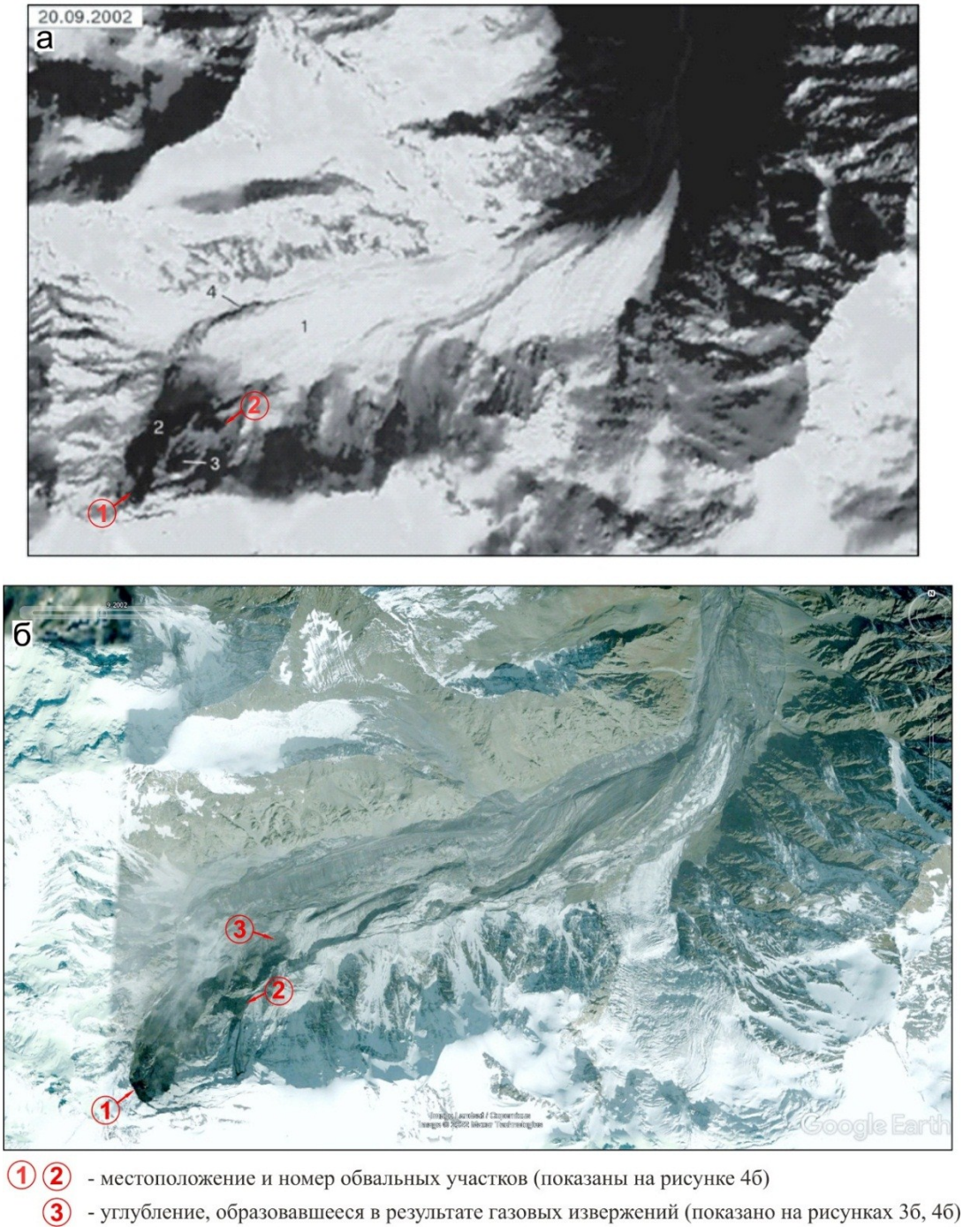


Рисунок 5. Ледниковый цирк Колка:
а) за 8,5 часов до катастрофы 20 сентября 2002 г. на космическом снимке Landsat 7ETM+:
1 – ледник Колка; 2 – зона выноса обвалившихся горных пород; 3 – место висячего ледника, обвалившегося в период с 19 августа до 20 сентября 2002 г.; 4 – тень уступа поверхности ледника [Тутубалина, Черноморец, Петраков, 2005]; б) по состоянию на 25.09.2002 г. (космоснимок Google).

Figure 5. Kolka Glacier Cirque:
a) 8.5 hours before the disaster on September 20, 2002 on the Landsat 7ETM+ satellite image:
1 – Kolka Glacier; 2 – the zone of removal of collapsed rocks; 3 – the place of the hanging glacier that collapsed in the period from August 19 to September 20, 2002; 4 – shadow of the ledge of the glacier surface [Tutubalina, Chernomorets, Petrakov, 2005]; b) as of September 25, 2002 (Google satellite image).

Н.В. Поггенполь в подтверждение слов Э.А. Штебера приходил к следующему выводу: «Не может быть никакого сомнения, что семь висячих фирн-глетчеров, четыре из которых доходили до поверхности Колки, соскользнули со склона один за другим, что послужило к образованию тех двух колоссальных лавин, которые проникли далеко в долину Генал-Дона» [цит. по: Котляков и др. 2014].

По материалам Д.Д. Пагирева «3 июля около 3 ч. дня в верховьях ледника послышался грохот, напоминавший пушечную пальбу». «После 4 ч. вода становилась все мутнее и мутнее и приток ее значительно увеличился. <…> Наконец из-под льда, откуда вытекал источник, с водой стали вырываться куски льда и камни. <…> Было около 7 часов вечера. Вдруг все ущелье огласилось необыкновенным гулом, шумом, грохотом! <…> Тут мы заметили, что со стороны горы по ущелью движется какая-то масса! <…> Смесь изо льда, камней, воды и песку с быстротою молнии пронеслась по ущелью, поглощая и стирая с лица земли все, что попадалось на пути» [Пагирев, 1902].

Эти данные позволяют предположить, что 3 июля 1902 г. около 3-х часов дня началась активная фаза обвалов, а вечером, в районе 18–19 часов, произошел массовый сход обвалов и склоновых лавин, сформировавших гигантскую ледово-снежно-каменную лавину, ринувшуюся в долину р. Геналдон. Вместе с тем, такие явления как «необыкновенный гул, шум, грохот» могут свидетельствовать и о проявлении эндогенных геологических процессов в ущелье Колка.

В.М. Котляков и соавторы на основании рисунка Н.В. Поггенполя, увидевшего место события 17 августа 1902 г., отмечают: «Однако мы видим, что рисунок, напротив, показывает обычную картину размещения ледников, фирна и скальных участков на склоне. Постоянство их положения видно и на старых снимках, и после подвижки ледника в 1970-е годы, вплоть до лета 2002 года. <…> Мы считаем наиболее вероятным, что событие 1902 г. началось с подвижки пульсирующего ледника, затем произошел резкий переход к катастрофическому выбросу льда, который был вызван другими причинами» [Котляков и др., 2014].

По данным Э.А. Штебера, свидетельства обвалов были запечатлены даже на фотографии: «Искренне завидую редактору «Терских Ведомостей» Г.А. Вертепову и студенту Касперовичу, которым хоть на короткое время представился случай осмотреть ущелье Колка и успеть сделать единственный в своем роде фотографический снимок обвалов, упавших в ущелье Колка. <…> 3-го августа выпал в горах снег, затем он выпадал еще несколько раз, и теперь уже не получить фотографии, на которой бы так ясно обрисовались места обрыва льда» [Штебер, 1904, с. 248].

Еще одно доказательство обвалов, произошедших 3 и 6 июля 1902 г. с правого борта ущелья Колка, приводится в записке межевого инженера Попова от 23 октября 1902 г.: «Событие 3-го июля сего года, выразившееся в необычайном падении фирна и льда с ледника «Колка», затем такое же событие, повторившееся 6-го июля, могли совершится только при условии одновременного падения на ледник «Колка» значительных масс снега и льда не только с большого числа описанных ледопадов, но и с расположенных выше этих ледопадов, ледяных полей главного Кавказского хребта. Только что высказанное положение подтверждается тем состоянием означенных ледопадов и расположенных над ними ледяных полей в котором они находились во время измерения их землемером Заводным 15–25 августа сего года» [Черноморец, Адцеев, 2014].

Следовательно в 1902 г. обвалы все-таки были и они могли стать одним из факторов катастрофических сходов ледово-каменных лавин из ущелья Колка.

Вместе с тем, приведенные в настоящей статье данные о газовых извержениях 2002 г. не исключают возможности проявления эндогенной деятельности и в 1902 г.

Например, [Бергер, 2006] утверждает: «Судя по известным признакам проявления, именно такой характер газодинамического (газопородного) выброса имели и другие известные пароксизмальные катастрофические пульсации ледника Колка <…>, но так и оставшиеся неразгаданными в генетическом плане».

В то же время, рассматривая эндогенную (взрывную) версию геналдонских катастроф 1902 года, необходимо ответить на ряд вопросов, а именно: почему еще до 3 июля, когда произошел первый выброс лавины, наблюдались медленные подвижки нижней части ледника; почему процесс схода ледника завершился опять же медленным движением огромной массы льда, остановленной стеной ледника Майли; почему 3 июля 1902 г. сразу же не был выброшен весь ледник, как это произошло 20 сентября 2002 г.? Наконец, нет никаких свидетельств о выходах фумарольных газов, которые в 2002 г. по сведениям [Котляков и др., 2014] наблюдались в колкинском цирке в течение месяца после схода ледника.

Гляциальный фактор

В материалах [Котляков и др., 2014] отмечается, что предпосылки к катастрофическим сходам ледника Колка заложены в строении ледника и морфологии долины Колка: «Причины такого строения ледника – интенсивное питание лавинами и обвалами льда; малые уклоны ложа; упор стекающего льда в сдерживающий левый борт и следующий крутой разворот линий тока льда вправо, массивный полого залегающий язык с нарастающим во времени моренным чехлом, затрудняющим таяние; широкая чаша цирка с относительно узким выходом. Все это вызывает постоянное подпруживание льда, накопление избыточных масс и нарастающее напряжение сдвигающих сил, приводящих к быстрой разгрузке льда».

О.В. Тутубилина и соавторы приводят очень важные сведения о состоянии ледника накануне катастрофы 2002 г.:

«Уникальные космические снимки Landsat 7 ETM+ от 19 августа, 4 и 20 сентября 2002 г. позволили оценить, что происходило в ледниковом цирке Колка за недели и считанные часы до катастрофы».

«Изменения в языковой части Колки между 19 августа и 20 сентября отсутствуют. Можно со всей уверенностью утверждать, что по состоянию на утро 20 сентября значительного продвижения фронта ледника не было».

«Приближение к морене <…> могло вызвать вспучивание поверхности из-за резкого падения скоростей движения и роста напряжений сжатия».

«Таким образом, представляется возможным, что в тыловой части ледника по состоянию на утро 20 сентября находился участок активизации, а в ходе катастрофы лед был выброшен и с языка ледника Колка. <…>

Выброс тыловой части ледника Колка привел к нарушению устойчивости его языка» [Тутубалина, Черноморец, Петраков, 2005].

Данные, приведенные в статье [Тутубалина, Черноморец, Петраков, 2005] о том, что на снимке 20 сентября накануне катастрофы в тыловой части ледника наблюдались признаки активизации, позволяют предположить, чтонабравший критическую массу ледник был подготовлен к разгрузке, но его сдерживала языковая часть, которая находилась в это время в стабильном состоянии. Это вполне объясняется данными [Котляков и др., 2014] – «подъем ложа ледника, сужение и поворот долины в районе «ригеля»[2]. Аналогичные сведения были получены К.П. Рототаевым перед разгрузкой ледника в 1969/70 гг.: « <…> к весне и лету 1969 г. <…> за головной частью появилось крупное вздутие поверхности, обозначающее зону высоких внутренних напряжений в толще ледника» [Рототаев и др., 2014].

Материалы [Котляков и др., 2014] свидетельствуют о том, что в ледниковом цирке Колка днище долины выстилают мертвые (погребенные) льды, мощность которых может достигать нескольких десятков метров. На погребенных льдах залегает собственно ледник Колка, который формируется за счет ледников-притоков и лавинного снега (в материалах [Болов, Мочалов, Муратов, 2014а] он

[2] В.М. Котляков и соавторы [Котляков и др., 2014] условно называют «ригелем» подковообразную поперечную гряду, образовавшуюся после схода ледника, состоящую из нагромождения глыб льда и обломочного материала, круто спускающуюся тремя ступенями вниз по долине.

называется долинным ледником, в монографии [Котляков и др., 2014] – донным льдом, в статье [Тутубалина, Черноморец, Петраков, 2005] – ледниковым льдом). В свою очередь долинный ледник перед катастрофой 2002 г. был перекрыт мощным обвальным конусом выноса, состоящим из обломков льда, фирна, горных пород и лавинного снега.

Рассмотрим три фотоснимка долины Колка, представленные рисунками 6а, 6б и 7. Фото на рисунках 6а и 6б сделаны приблизительно с одного ракурса, первое – 22.09.2001, второе – в первых числах сентября 2002 г., незадолго до схода ледника Колка. На рисунке 6а ниже языка ледника в днище долины С.С Черноморцем обозначены массивы мертвых льдов покрытые мореной. На рисунке 6б на поверхности ледника Колка, в том числе и в нижней его части, видны отложения обвального конуса выноса.

Обратимся далее к фотографии Г.А. Носенко [Котляков и др., 2014] (рисунок 7), которая была сделана в июле 2003 г., когда днище долины Колка еще сохранило свой практически неизменный облик после схода ледника в 2002 г.

На фото отчетливо просматриваются два участка с поперечными уступами, на крутых откосах которых обнажается массивный лед. [3]

Верхний сдвоенный уступ расположен в тыловой части ледника Колка. Нижний тройной уступ проходит вдоль линии поперечной ступени, отмеченной на фотографии краснодарской группы туристов (рисунок 6б), в районе «ригеля» [Тавасиев, 2014].[4]

В.М. Котляков и соавторы считают, что верхние уступы сложены массивом льда, оставшимся в тылу цирка. По поводу «ригеля», где расположены нижние уступы, сказано следующее: «Мы полагаем, что причиной образования гряды служил не только подъем ложа, но сужение и поворот долины на этом участке. Все это вместе затруднило уход наиболее крупных и тяжелых остатков разрушившегося ледника, и произошел, отрыв «хвоста» – крупного массива льда и камней – от основной массы движущегося потока» [Котляков и др., 2014].

Приведенные рисунки 6 и 7 позволяют предположить, что ступенчатые уступы – это не что иное, как формы рельефа, образовавшиеся в результате отрыва льда на разных гипсометрических уровнях при сходе ледника Колка. В том числе, в первом случае сдвоенный уступ в тыловой части ледникового цирка отражает линию отрыва долинного льда, во втором случае, тройной уступ в районе погребенных льдов, проходящую по ранее заложенной поперечной по отношению к долине Колка трещине, четко проявившейся в днище и на бортах ложа после схода ледника. Причины образования в погребенных льдах в районе «ригеля» поперечной трещины неясны и возможно связаны с неотектоникой.

Доказательством вовлечения в ледово-каменный поток погребенных льдов служит рисунок 6а, где полого залегающая поверхность «ригеля», – линию отрыва массива долинного льда и мертвых льдов прослеживается непосредственно на продолжении фронтальной части языка долинного ледника. При обследовании ледника 22 сентября 2001 г. также было установлено, что «перед Колкой отчетливо просматривались большие массивы мертвых льдов» [Поповнин и др., 2003].

В то же время, на фотографии Г.А. Носенко (рисунок 7) можно наблюдать на участке, где ранее залегал массив мертвых льдов, резкое понижение рельефа, с образованием крутых уступов.

Таким образом, при сходе ледника Колка, в ледово-каменном потоке, наряду с долинным льдом и материалом конуса выноса, также участвовал и погребенный лед.

[3] Аналогичная фотография с ледовыми уступами есть и у И.М. Васькова [Васьков, 2016]. Надо сказать, что после схода ледника Колка в 2002 г. мы имеем весьма редкую и даже уникальную возможность рассмотреть днище ледникового цирка практически полностью освобожденным от пришедшего в движение льда.

[4] Наличие ступеней на поверхности ледника позволило Р.А. Тавасиеву [Тавасиев, 2014] по этой фотографии сделать вывод, что «<…> подвижка ледника Колка происходила уже в первых числах сентября 2002 г.!»

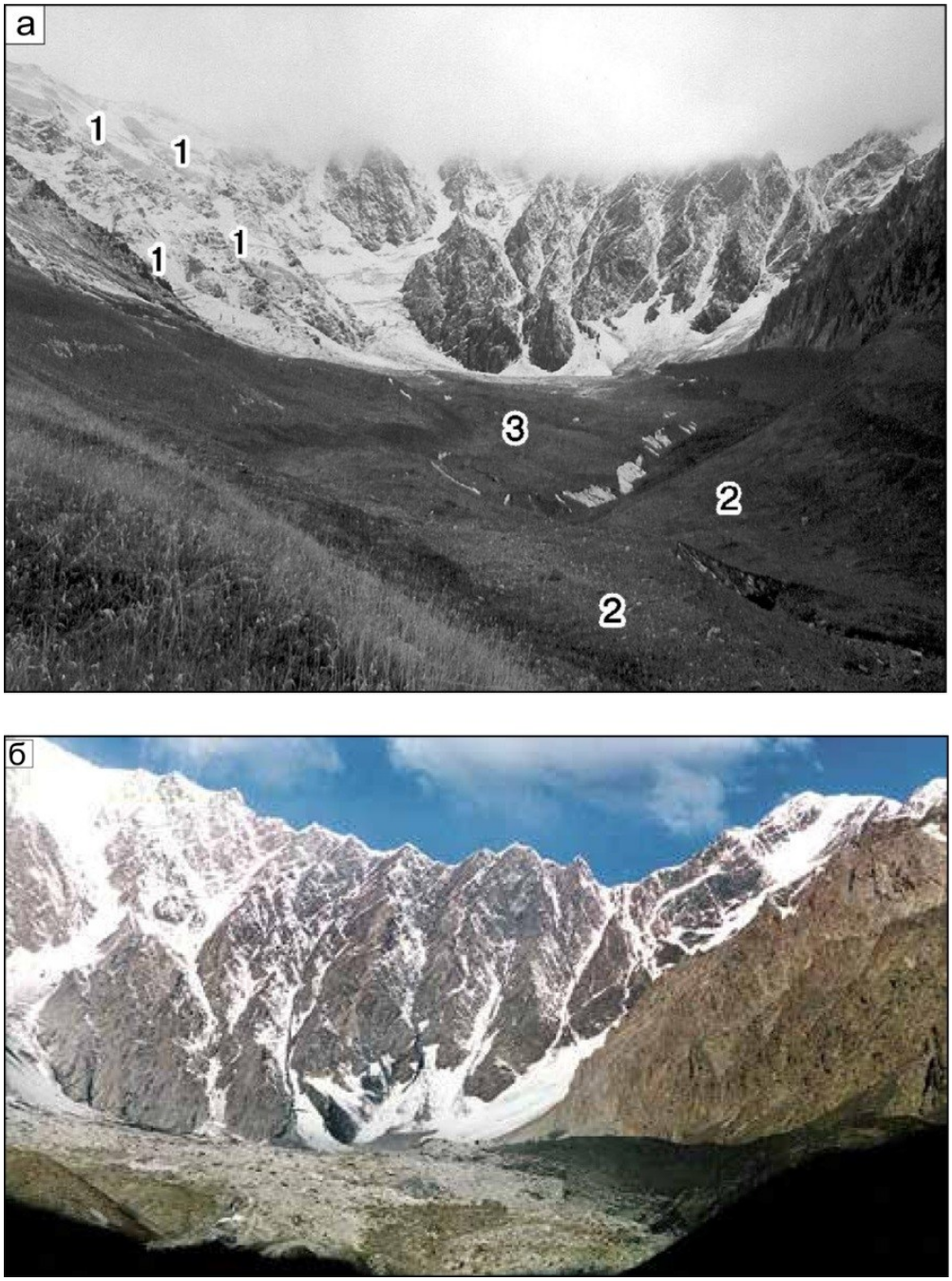


Рисунок 6. Вид на ледник Колка:
а) за год до катастрофы – 22.09.2001 г.: 1 – висячие ледники на склонах Джимарай-хоха; 2 – массивы мертвых льдов, покрытые мореной; 3 – замороженный язык ледника Колка (фото С.С. Черноморца); б) обломочный материал на поверхности ледника Колка в первых числах сентября 2002 г. (фото краснодарской группы туристов под руководством О.В. Неподобы).

Figure 6. View of the Kolka glacier:
a) a year before the disaster – September 22, 2001: 1 – hanging glaciers on the slopes of Jimaray-khokh; 2 – stagnant ice massifs covered with moraine; 3 – frozen tongue of the Kolka glacier (photo by S.S. Chernomorets); b) detrital material on the surface of the Kolka Glacier in the first days of September 2002 (photo of the Krasnodar group of tourists led by O.V. Nepodoba).

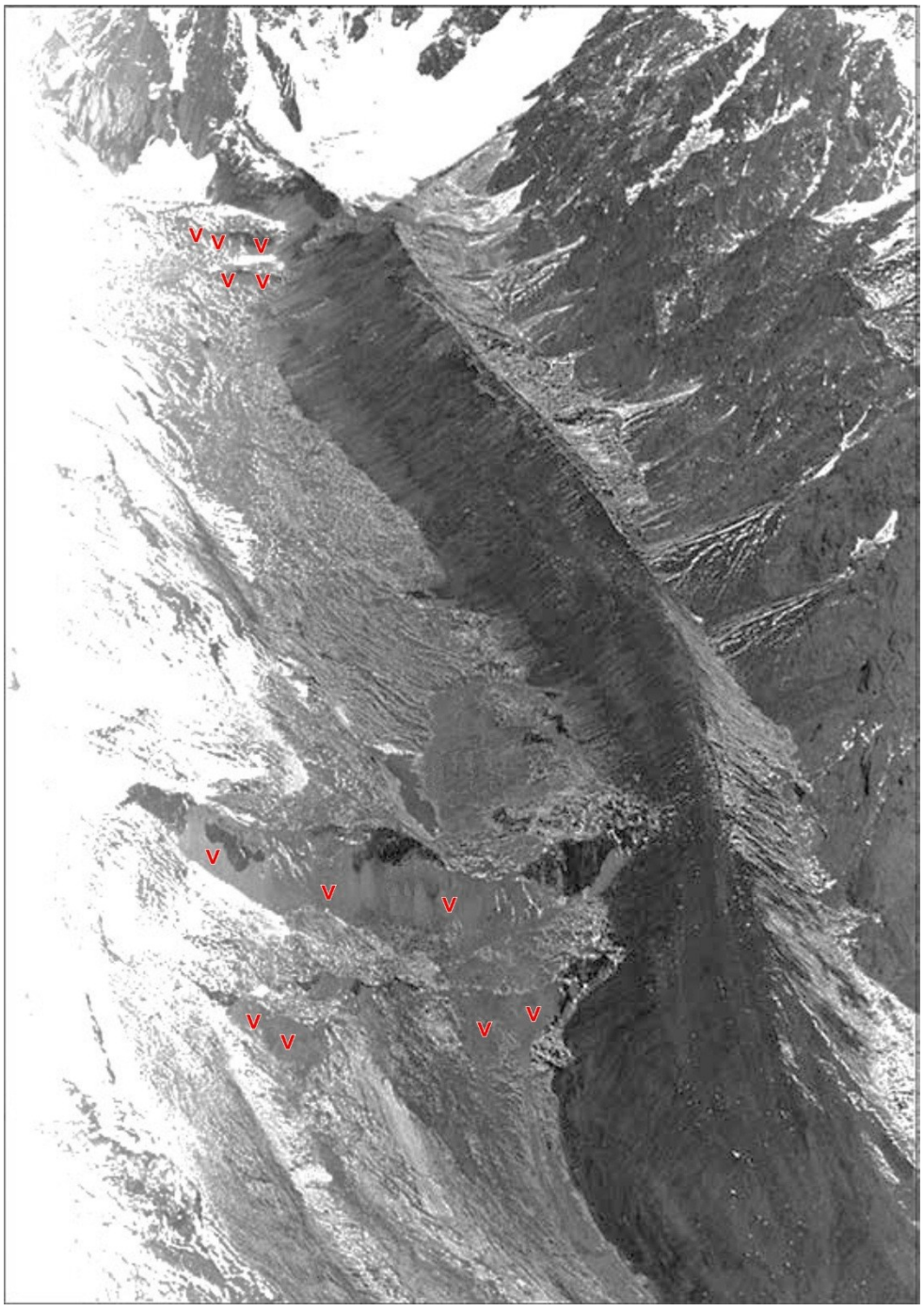


Рисунок 7. Поперечные уступы (**V V**), образовавшиеся после схода ледника Колка (фото Г.А. Носенко, 27.06.2003 г.).

Figure 7. Transverse ledges (**V V**) formed after the collapse of the Kolka glacier (photo by G.A. Nosenko, June 27, 2003).

Верхняя часть крутых уступов, состоящая из нагромождения глыб льда и обломочного материала горных пород, как отмечают [Котляков и др., 2014], представляет собой оставшуюся часть («хвост») от основной массы движущегося потока.

Относительно 1969 г. В.Р. Болов и соавторы считают, что «Объем льда, вынесенный более чем на 4 км за пределы бассейна ледника Колка, <…> состоял примерно из равных частей масс льда обвалов и собственно долинного ледника» [Болов, Мочалов, Муратов, 2014а].Что касается событий 1902 г., то в материалах [Черноморец, Адцеев, 2014], наряду с информацией о катастрофических выбросах ледника Колка в долину р. Геналдон 3 и 6 июля, приводятся

сведения и о медленных подвижках льда: «Обнаруженные документы свидетельствуют также о третьем продвижении ледника» «<…> 16 июля со стороны Майлинского ледника и ущелья Колка были слышны треск и сильный шум после чего из ущелья Колка показался Ледник громадных размеров и частью ледник уперся в Майлинский ледник».

В материалах [Запорожченко, 2003а; Котляков и др., 2014] также говорится о медленном продвижении ледника Колка еще до катастрофы 3 июля 1902 г.

Следовательно, подвижки долинного ледника Колка происходили как до 3 июля, так и после 6 июля.

Приведенные сведения указывают, что 3 и 6 июля 1902 г. катастрофические лавины, прошедшие по р. Геналдон, главным образом, включали склоновые обвальные и лавинные массы, обрушившиеся с правого борта ущелья и захватившие нижнюю часть ледника Колка, а 16 июля в движение пришла основная масса долинного ледника.

В материалах [Пагирев, 1902] сообщается, что в русле р. Геналдон «поверхность ледника, доступная взору, представляет из себя грязную массу, состоящую из песка, камней, льда и снега».

Таким образом, катастрофические лавины, формирующиеся в ущелье Колка, в зависимости от конкретных условий могут включать в различных комбинациях долинный лед, склоновый лавинный и обвальный материал, отложения конуса выноса, погребенные льды и даже выброшенные при газовых извержениях раздробленные горные породы.

В этой связи обратимся к работе [Запорожченко, 2003б], где проводится аналогия формирования ледово-каменных лавин в ущелье Колка с Уаскаранскими лавинами, сошедшими в 1962 и 1970 гг. в горах Кордильера Бланка (Перу) и также имевшими катастрофические последствия. Достоверно установлено, что образование лавины в 1962 г. было связано со сверхобильными снегопадами зимой 1961 г. и последующим необычайно влажным и дождливым летом, «что привело <…> к отрыву тяжелого слоя снега и льда. Фронтальная часть откололась и обрушилась вниз». А в 1970 г. причиной лавины стал оторвавшийся в результате сильного землетрясения с той же горы Уаскаран «<…> гигантский блок горных пород и льда объемом в несколько миллионов кубических метров. Вся эта масса с километровой высоты обрушилась на ледник».

К сожалению, участие высокой энергетики приземной атмосферы в переносе промчавшихся по долине р. Геналдон масс – подъёмно-вихревой характер воздушных потоков, кратковременное существование «воздушной подушки», отмечаемые, к примеру, во время Уаскаранской трагедии 1970 г. в Перуанских Альпах – прошло мимо внимания отечественных исследователей «схода Колки» 2002 г. [Запорожченко, 2003б]. Между тем на формирование «воздушно-водо-каменно-ледовой лавины» указывают все непосредственные свидетели аналогичных исторических событий.

Выводы

Большинство авторов публикаций о Геналдонской катастрофе сходятся во мнении, что «сход ледника Колка» 20 сентября 2002 г. обусловлен сочетанием нескольких природных факторов.

Анализ происходивших в ущелье Колка климатических, эндогенных и экзогенных процессов говорит о том, что это событие связано «прежде всего с глубинными эндогенными геологическими факторами – тектонической активизацией и раскрытием зон повышенной проницаемости земной коры (глубинных разломов)». [Бергер, 2006].

Максимальная деятельность эндогенных процессов проявилась в августе – сентябре 2002 г., когда на начальном этапе произошло подновление трещин в разломных зонах, вызвавшее резкую активизацию обвалов, а на заключительном – раскрытие тектонических трещин, сопровождавшееся газовыми извержениями.

В ледниковом цирке Колка установлены две активные тектонические зоны – субширотного (ВСВ) и меридионального простирания. Подвижки вдоль субширотного нарушения привели к формированию системы кулисообразно расположенных гравитационно-

тектонических трещин и блоков, обвалам горных пород и льда на правом борту долины на пересечении с меридиональным разломом. Обвалам также способствовали тепловые потоки в ослабленных тектонических зонах, приводящие к усиленному оттаиванию многолетнемерзлых пород.

К пересечению субширотного и меридионального разломов приурочен участок проявления газовых извержений, в результате которых произошел выброс раздробленного обломочного материала и образование ниши в днище долины Колка протяженностью 370 м и объемом порядка 0,5 млн. м^3.

Причиной схода ледника Колка вечером 20 сентября 2002 г. скорее всего стал сильнейший взрыв в начальной стадии газовых извержений, который сорвал ледник с его ложа и выбросил вниз по долине с огромной скоростью. Этот взрыв также вызвал землетрясение, зарегистрированное в 20 час. 08 мин. 30 сек. всеми окружающими станциями и, вероятно, сильную обвальную активизацию на крутых склонах ледового цирка.

Место проявления газовых извержений находится под тыловой частью ледника Колка, набравшего перед катастрофой массу до 100 млн. т., что в совокупности и привело к одномоментному выбросу ледника, а в итоге, к небывалому масштабу бедствия с трагическими последствиями.

Рассматривая геналдонские катастрофы 1902 и 2002 гг., нельзя сбрасывать со счетов возможное влияние на происходящие в ущелье Колка процессы одиннадцатилетних и вековых периодов климатических колебаний, обусловленных изменениями интенсивности солнечной активности.

В том числе, на 2002 г. приходится второй пик двойного максимума одиннадцатилетнего цикла солнечной активности. Первый пик наблюдался в 2000 г., когда по р. Герхожан-су в Кабардино-Балкарской Республике прошла серия катастрофических селей гляциального генезиса, причинивших огромный ущерб г. Тырныауз.

В этом же 2002 г., наряду с Геналдонской катастрофой, произошло экстраординарное наводнение на Северном Кавказе, которое было вызвано совпавшими во времени максимальными, по данным наблюдений за 70 предшествующих лет, уровнями грунтовых вод и атмосферными осадками.

Таким образом, аномальные проявления климатических факторов, эндогенных и экзогенных процессов в 1902 и 2002 гг. в долине р. Колка, скорее всего, носят планетарный характер и могут быть приурочены к вековым циклам солнечной активности.

Литература

Бергер М.Г. Природная катастрофа на леднике Колка 20 сентября 2002 года – внезапный газодинамический выброс ледника // Предупреждение опасных ситуаций в высокогорных районах. Доклады международной конференции Владикавказ – Москва, 23 – 26 июня 2004 г. Владикавказ: Олимп, 2006. С. 41–49.

Болов В.Б., Мочалов В.П., Муратов Ш.С. Гляциальные катастрофы и их предвестники в бассейне р. Геналдон Республики Северная Осетия–Алания // Ледник Колка: вчера, сегодня, завтра. Монография / Ответственные редакторы Ю.Г. Леонов, В.Б. Заалишвили. Владикавказ: Центр геофизических исследований Владикавказского научного центра РАН и РСО-А, 2014а. С. 291–295.

References

Berger M.G. Prirodnaya katastrofa na lednike Kolka 20 sentyabrya 2002 goda – vnezapnyj gazodinamicheskij vybros lednika [Natural disaster on the Kolka glacier on September 20, 2002 – sudden gas-dynamic release of the glacier] *Preduprezhdenie opasnyh situacij v vysokogornyh rajonah. Doklady mezhdunarodnoj konferencii Vladikavkaz [Prevention of dangerous situations in high-altitude areas]*. [*Reports of the international conference Vladikavkaz] (June 23–26, 2004, Moscow)]*. Vladikavkaz: Olympus, 2006. pp. 41–49. (In Russian).

Bolov V.B., Mochalov V.P., Muratov S.S. Glyacial'nye katastrofy i ih predvestniki v bassejne r. Genaldon Respubliki Severnaya Osetiya–Alaniya [Glacial catastrophes and their precursors in the Genaldon River basin of the Republic of North Ossetia–Alania]. In Yu.G. Leonov, V.B. Zaalishvili

Болов В.Б., Мочалов В.П., Муратов Ш.С. Природные катастрофы, обусловленные обвалами и пути их предупреждения. // Ледник Колка: вчера, сегодня, завтра. Монография / Ответственные редакторы Ю.Г. Леонов, В.Б. Заалишвили. Владикавказ: Центр геофизических исследований Владикавказского научного центра РАН и РСО-А, 2014б. С. 296–301.

Васьков И.М. Геналдонская катастрофа 2002 г. Основные факты и этапы развития // Ледник Колка: вчера, сегодня, завтра. Монография. / Ответственные редакторы Ю.Г. Леонов, В.Б. Заалишвили. Владикавказ: Центр геофизических исследований Владикавказского научного центра РАН и РСО-А, 2014б. С. 252–263.

Васьков И.М. Катастрофические обвалы: происхождение и прогноз / Владикавказ: ООО НПКП «МАВР», 2016. 369 с.

Васьков И.М., Караев Ю.И., Маковозова З.С., Хубулов А.И. 20 лет событию в долине р. Геналдон – геологической катастрофе мирового масштаба (Центральный Кавказ, Северная Осетия) // Результаты 20 лет изучения катастрофы мирового масштаба в Геналдонском ущелье (сход ледника Колка): Владикавказ, 20–21 сентября 2022 г. Владикавказ: Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), 2022. С. 8–39.

Гурбанов А.Г. Результаты проведенных геологических, геофизических, геодезических и дистанционных исследований как основа разработки Программы комплексного мониторинга с отслеживанием и анализом признаков вулканической опасности в пределах Казбекского вулканического центра в Геналдонском ущелье // Ледник Колка: вчера, сегодня, завтра. Монография / Ответственные редакторы Ю.Г. Леонов, В.Б. Заалишвили. Владикавказ: Центр геофизических исследований Владикавказского научного центра РАН и РСО-А, 2014. С. 113–114.

Заалишвили В.Б., Невская Н.И., Харебов К.С. Анализ инструментальных записей схода ледника Колка (по данным локальной сети сейсмических наблюдений) // Ледник Колка: вчера, сегодня, завтра. Монография / Ответственные редакторы (ed.) *Lednik Kolka: vchera, segodnya, zavtra [Kolka Glacier: yesterday, today, tomorrow]*. Vladikavkaz, Publ. Center for Geophysical Research of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences and RSO-A, 2014a. pp. 291–295. (In Russian).

Bolov V.B., Mochalov V.P., Muratov S.S. Prirodnye katastrofy, obuslovlennye obvalami i puti ih preduprezhdeniya [Natural disasters caused by landslides and ways to prevent them]. In Yu.G. Leonov, V.B. Zaalishvili (ed.) *Lednik Kolka: vchera, segodnya, zavtra [Kolka Glacier: yesterday, today, tomorrow]*. Vladikavkaz, Publ. Center for Geophysical Research of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences and RSO-A, 2014a. pp. 296–301. (In Russian).

Vaskov I.M. Genaldonskaya katastrofa 2002 g. Osnovnye fakty i etapy razvitiya [The Genaldon catastrophe of 2002 Basic facts and stages of development]. In Yu.G. Leonov, V.B. Zaalishvili (ed.) *Lednik Kolka: vchera, segodnya, zavtra [Kolka Glacier: yesterday, today, tomorrow]*. Vladikavkaz, Publ. Center for Geophysical Research of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences and RSO-A, 2014b. pp. 252–263. (In Russian).

Vaskov I.M. *Katastroficheskie obvaly: proiskhozhdenie i prognoz [Catastrophic collapses: origin and forecast]*. Vladikavkaz, Publ. LLC NPKP MAVR, 2016. 369 p. (In Russian).

Vaskov I.M., Karaev Yu.I., Makovozova Z.S., Khubulov A.I. 20 let sobytiyu v doline r. Genaldon – geologicheskoj katastrofe mirovogo masshtaba (Central'nyj Kavkaz, Severnaya Osetiya) [20 years of the event in the valley of the Genaldon River – a geological catastrophe on a global scale (Central Caucasus, North Ossetia)]. *Rezul'taty 20 let izucheniya katastrofy mirovogo masshtaba v Genaldonskom ushchel'e (skhod lednika Kolka)* [*Results of 20 years of studying a global catastrophe in the Genaldon gorge (Kolka glacier descent)(Vladikavkaz, September 20-21, 2022)]*. Vladikavkaz, Publ. North Caucasus Mining and Metallurgical Institute (State Technological University), 2022. pp. 8–39. (In Russian).

Ю.Г. Леонов, В.Б. Заалишвили. Владикавказ: Центр геофизических исследований Владикавказского научного центра РАН и РСО-А, 2014. С. 141–149.

Запорожченко Э.В. Сход ледника Колка 20 сентября 2002 года и его последствия // Наследие, Вестник № 4. Пятигорск, 2003а, С. 44–48.

Запорожченко Э.В. Ледниик Колка и долина р. Геналдон: вчера, сегодня, завтра // Сборник научных трудов ОАО «Севкавгипроводхоз». № 16. Пятигорск, 2003б. С. 15–35.

Котляков В.М., Рототаева О.В., Носенко Г.А., Десинов Л.В., Осокин Н.И., Чернов Р.А. Кармадонская катастрофа: что случилось и чего ждать дальше / Русское географическое общество. Москва: ООО «Издательский дом «Кодекс», 2014. 184 с.

Лебедева И.М., Рототаева О.В. Климатический фактор катастрофической подвижки ледника Колка в 2002 году // Материалы гляциологических исследований. 2005. № 97. С. 155–161.

Лохов Э.Г., Полквой А.П. Происхождение «муравьиных куч» // Рекреация и горы. Тезисы докладов 8-го научно-практического семинара по рекреационной географии. Владикавказ: Северо-Осетинский государственный университет им. К.Л. Хетагурова, 2010, С. 35–37.

Муравьев Я.Д. Газовое извержение в Колкинском цирке – возможная причина развития подвижек ледника по катастрофическому сценарию // Ледник Колка: вчера, сегодня, завтра. Монография / Ответственные редакторы Ю.Г. Леонов, В.Б. Заалишвили. Владикавказ: Центр геофизических исследований Владикавказского научного центра РАН и РСО-А, 2014. С. 104–112.

Носов К.Н., Сейнова И.Б., Запорожченко Э.В. Изменение условий пропуска паводков на реках Геналдон и Гизельдон после быстрого продвижения ледника Колка (Северный Кавказ, Россия) // Сборник научных трудов ОАО «Севкавгипроводхоз». № 17. Пятигорск, 2007. С. 45–68.

Осокин Н.И. Ледник Колка сегодня. Какой ледник будет опасен завтра // Ледник Колка: вчера, Gurbanov A.G. Rezul'taty provedennyh geologicheskih, geofizicheskih, geodezicheskih i distancionnyh issledovanij kak osnova razrabotki Programmy kompleksnogo monitoringa s otslezhivaniem i analizom priznakov vulkanicheskoj opasnosti v predelah Kazbekskogo vulkanicheskogo centra v Genaldonskom ushchel'e [The results of geological, geophysical, geodetic and remote studies as the basis for the development of a comprehensive monitoring program with tracking and analysis of signs of volcanic danger within the Kazbek volcanic center in the Genaldon gorge]. In Yu.G. Leonov, V.B. Zaalishvili (ed.) *Lednik Kolka: vchera, segodnya, zavtra [Kolka Glacier: yesterday, today, tomorrow]*. Vladikavkaz, Publ. Center for Geophysical Research of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences and RSO-A, 2014. pp. 113–114. (In Russian).

Zaalishvili V.B., Nevskaya N.I., Kharebov K.S. Analiz instrumental'nyh zapisej skhoda lednika Kolka (po dannym lokal'noj seti sejsmicheskih nablyudenij) [Analysis of instrumental records of the Kolka glacier descent (according to the local network of seismic observations)]. In Yu.G. Leonov, V.B. Zaalishvili (ed.) *Lednik Kolka: vchera, segodnya, zavtra [Kolka Glacier: yesterday, today, tomorrow]*. Vladikavkaz, Publ. Center for Geophysical Research of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences and RSO-A, 2014. pp. 141–149. (In Russian).

Zaporozhchenko E.V. Skhod lednika Kolka 20 sentyabrya 2002 goda i ego posledstviya [The descent of the Kolka glacier on September 20, 2002 and its consequences] *Nasledie, Vestnik Pyatigorsk [Heritage, Bulletin Pyatigorsk],* 2003a, no. 4, pp. 44–48. (In Russian)/

Zaporozhchenko E.V. Ledniik Kolka i dolina r. Genaldon: vchera, segodnya, zavtra [Ledniik Kolka and the valley of the Genaldon River: yesterday, today, tomorrow] *Sbornik nauchnyh trudov OAO «Sevkavgiprovodhoz» [Collection of scientific papers of JSC Sevkavgiprovodkhoz],* Pyatigorsk, 2003b, no. 16, pp. 15–35 (In Russian).

Kotlyakov V.M., Rototaeva O.V., Nosenko G.A., Desinov L.V., Osokin N.I., Chernov R.A. *Karmadonskaya katastrofa: chto sluchilos' i chego zhdat' dal'she [Karmadon catastrophe: what*

сегодня, завтра. Монография / Ответственные редакторы Ю.Г. Леонов, В.Б. Заалишвили. Владикавказ: Центр геофизических исследований Владикавказского научного центра РАН и РСО-А, 2014. С. 307–313.

Пагирев Д.Д., Падение ледников с Гимарай-хоха // Известия Кавказского отдела Императорского Русского географического общества. Тифлис, 1902. Том XV. № 3. С. 205–210.

Поповнин В.В., Петраков Д.А., Тутубалина О.В., Черноморец С.С. Гляциальная катастрофа 2002 года в Северной Осетии // Криосфера Земли. 2003. Т. VII. №1. С. 56–77.

Рототаев К.П., Ходаков В.Г., Кренке А.Н., Подвижка ледника Колка в 1969-1970 годах // Ледник Колка: вчера, сегодня, завтра. Монография / Ответственные редакторы Ю.Г. Леонов, В.Б. Заалишвили. Владикавказ: Центр геофизических исследований Владикавказского научного центра РАН и РСО-А, 2014. С. 23–29.

Тавасиев Р.А. О некоторых дискуссионных вопросах, связанных с катастрофическим сходом ледника Колка // Ледник Колка: вчера, сегодня, завтра. Монография. / Ответственные редакторы Ю.Г. Леонов, В.Б. Заалишвили. Владикавказ: Центр геофизических исследований Владикавказского научного центра РАН и РСО-А, 2014. С. 272–283.

Тутубалина О.В., Черноморец С.С., Петраков Д.А. Ледник Колка перед катастрофой 2002 года: новые данные // Криосфера Земли. 2005. Т. IX. №4. С. 62–71.

Черноморец С.С, Адцеев В.Г. Ледниковые катастрофы в Геналдонском ущелье: взгляд в прошлое // Ледник Колка: вчера, сегодня, завтра. Монография. / Ответственные редакторы Ю.Г. Леонов, В.Б. Заалишвили. Владикавказ: Центр геофизических исследований Владикавказского научного центра РАН и РСО-А, 2014. С. 329–426.

Чотчаев Х.О., Малиев И.Н. О гидродинамической и газодинамической гипотезах причин схода ледника Колка 20 сентября 2002 г. // Ледник Колка: вчера, сегодня, завтра. Монография / Ответственные редакторы Ю.Г. Леонов, В.Б. Заалишвили. Владикавказ: Центр геофизических

happened and what to expect next] Moscow, Publ. Russian Geographical Society: LLC Publishing house Codex, 2014. 184 p. (In Russian).

Lebedeva I.M., Rototaeva O.V. Klimaticheskij faktor katastroficheskoj podvizhki lednika Kolka v 2002 godu [Climatic factor of catastrophic movement of the Kolka glacier in 2002] *Materialy glyaciologicheskih issledovanij [Materials of glaciological studies],* 2005, no. 97. pp. 155–161. (In Russian).

Lokhov E.G., Polkvoy A.P. Proiskhozhdenie «murav'inyh kuch» *[The origin of "ant heaps"] Rekreaciya i gory. Tezisy dokladov 8-go nauchno-prakticheskogo seminara po rekreacionnoj geografii*. [*Recreation and mountains. Abstracts of the 8th scientific and practical seminar on recreational geography]*. Vladikavkaz, Publ. K.L. Khetagurov North Ossetian State University, 2010, pp. 35–37. (In Russian).

Muraviev Ya.D. Gazovoe izverzhenie v Kolkinskom cirke – vozmozhnaya prichina razvitiya podvizhek lednika po katastroficheskomu scenariyu [Gas eruption in the Kolka Cirque – a possible reason for the development of glacier movements in a catastrophic scenario]. In Yu.G. Leonov, V.B. Zaalishvili (ed.) *Lednik Kolka: vchera, segodnya, zavtra [Kolka Glacier: yesterday, today, tomorrow]*. Vladikavkaz, Publ. Center for Geophysical Research of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences and RSO-A, 2014. pp. 104–112. (In Russian).

Nosov K.N., Seinova I.B., Zaporozhchenko E.V. Izmenenie uslovij propuska pavodkov na rekah Genaldon i Gizel'don posle bystrogo prodvizheniya lednika Kolka (Severnyj Kavkaz, Rossiya) [Changing flood conditions on the Genaldon and Gizeldon rivers after the rapid advance of the Kolka glacier (North Caucasus, Russia)] *Sbornik nauchnyh trudov OAO «Sevkavgiprovodhoz» [Collection of scientific papers of JSC Sevkavgiprovodkhoz],* Pyatigorsk, 2007, no. 17, pp. 45–68 (In Russian).

Osokin N.I. Kolka Glacier today. Lednik Kolka segodnya. Kakoj lednik budet opasen zavtra [Which glacier will be dangerous tomorrow]. In Yu.G. Leonov, V.B. Zaalishvili (ed.) *Lednik Kolka: vchera, segodnya, zavtra [Kolka Glacier: yesterday, today, tomorrow],* Vladikavkaz, Publ. Center for

исследований Владикавказского научного центра РАН и РСО-А, 2014. С. 265–270.

Штебер. Э.А. Ледовые обвалы в истоках Геналдона // Терский сборник: Литературно-научное приложение к «Терскому календарю» 1903 г. 1904. Вып. 6. С 233–248.

Geophysical Research of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences and RSO-A, 2014. pp. 307–313. (In Russian).

Pagirev D.D. Padenie lednikov s Gimaraj-hoha [The fall of glaciers from Guimaraj-hoha] *Izvestiya Kavkazskogo otdela Imperatorskogo Russkogo geograficheskogo obshchestva* [*Izvestiya Kavkazskogo dept. of the Imperial Russian Geographical Society],* Tiflis, 1902, vol. XV, no. 3, pp. 205–210. (In Russian).

Popovnin V.V., Petrakov D.A., Tutubalina O.V., Chernomorets S.S. Glyacial'naya katastrofa 2002 goda v Severnoj Osetii [Glacial catastrophe of 2002 in North Ossetia] *Kriosfera Zemli [Cryosphere of the Earth]*, 2003, vol. VII, no. 1, pp. 56–77. (In Russian).

Rototaev K.P., Khodakov V.G., Krenke A.N. Podvizhka lednika Kolka v 1969–1970 godah [The movement of the Kolka glacier in 1969–1970]. In Yu.G. Leonov, V.B. Zaalishvili (ed.) *Lednik Kolka: vchera, segodnya, zavtra [Kolka Glacier: yesterday, today, tomorrow],* Vladikavkaz, Publ. Center for Geophysical Research of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences and RSO-A, 2014. pp. 23–29. (In Russian).

Tavasiev R.A. O nekotoryh diskussionnyh voprosah, svyazannyh s katastroficheskim skhodom lednika Kolka [On some controversial issues related to the catastrophic descent of the Kolka glacier]. In Yu.G. Leonov, V.B. Zaalishvili (ed.) *Lednik Kolka: vchera, segodnya, zavtra [Kolka Glacier: yesterday, today, tomorrow],* Vladikavkaz, Publ. Center for Geophysical Research of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences and RSO-A, 2014. pp. 272–283. (In Russian).

Tutubalina O.V., Chernomorets S.S., Petrakov D.A. Lednik Kolka pered katastrofoj 2002 goda: novye dannye [Kolka glacier before the catastrophe of 2002: new data]. In Yu.G. Leonov, V.B. Zaalishvili (ed.) *Lednik Kolka: vchera, segodnya, zavtra [Kolka Glacier: yesterday, today, tomorrow],* Vladikavkaz, Publ. Center for Geophysical Research of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences and RSO-A, 2014. pp. 62–71. (In Russian).

Chernomorets S.S., Adtseev V.G. Lednikovye katastrofy v Genaldonskom ushchel'e: vzglyad v

proshloe [Glacial catastrophes in the Genaldon Gorge: a look into the past]. In Yu.G. Leonov, V.B. Zaalishvili (ed.) *Lednik Kolka: vchera, segodnya, zavtra [Kolka Glacier: yesterday, today, tomorrow],* Vladikavkaz, Publ. Center for Geophysical Research of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences and RSO-A, 2014. pp. 329–426. (In Russian).

Chotchaev Kh.O., Maliev I.N. O gidrodinamicheskoj i gazodinamicheskoj gipotezah prichin skhoda lednika Kolka 20 sentyabrya 2002 g. [On hydrodynamic and gas-dynamic hypotheses of the causes of the collapse of the Kolka glacier on September 20, 2002]. In Yu.G. Leonov, V.B. Zaalishvili (ed.) *Lednik Kolka: vchera, segodnya, zavtra [Kolka Glacier: yesterday, today, tomorrow],* Vladikavkaz, Publ. Center for Geophysical Research of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences and RSO-A, 2014. pp. 265–270. (In Russian).

Steber. E.A. Ledovye obvaly v istokah Genal-dona [Ice collapses in the sources of the Genal-don] *Terskij sbornik: Literaturno-nauchnoe prilozhenie k Terskomu kalendaryu 1903 g [Tersk collection: A literary and scientific appendix to the Tersk calendar 1903],* 1904, iss. 6, pp. 233–248. (In Russian).

ГЛОБАЛЬНЫЕ И РЕГИОНАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИРОДЫ И КЛИМАТА
GLOBAL AND REGIONAL CHANGES OF NATURE AND CLIMATE

УДК 551.583 DOI: 10.34753/HS.2023.5.1.34

РОЛЬ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ В АРКТИЧЕСКОМ УСИЛЕНИИ ПОТЕПЛЕНИЯ КЛИМАТА

В.Ф. Логинов
Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси, г. Минск, Беларусь
info@nature-nas.by

Аннотация. Рассмотрена возможная роль различных факторов в формировании арктического усиления потепления климата в последние тридцать лет. Скорость роста температуры в высоких широтах (70–90° с.ш.) изменяется от 0,03°C (июнь) до 0,23°C (октябрь). Среднее повышение температуры высоких широт за период с октября по апрель, когда Северный Ледовитый океан покрыт льдом в эпоху современного потепления климата (1990–2022 годы) составил 4,2°C. Положительная альбедная связь обеспечивает около одной трети указанного роста температуры. Приблизительно две трети повышения температуры в указанные месяцы года можно объяснить изменениями притоков скрытого тепла из океана в атмосферу. Они достигают максимальных значений в октябре. Значительные притоки скрытого тепла приходятся на холодное время года. В указанные месяцы года, как показано в работе Г.В. Алексеева [Алексеев, Харланенкова, Вязилова, 2023], формируется активный воздухообмен между полярными широтами и остальной частью Северного полушария.

Максимальная скорость роста температуры в период с 1990 по 2022 год в октябре месяце, превышающая среднегодовую скорость роста в 1,7 раза, связана с усилением притоков скрытого тепла из Северного Ледовитого океана в атмосферу. В высоких широтах Южного полушария максимальная скорость роста температуры обнаружена в мае месяце (конец

THE ROLE OF VARIOUS FACTORS IN THE ARCTIC GROWTH OF CLIMATE WARMING

Vladimir F. Loginov
Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus
info@nature-nas.by

Abstract. An exceptionally possible role of various risk factors for the Arctic risk of climate warming in the country. The temperature growth rate in high latitudes (70–90° N) decreases from 0.03° (June) to 0.23° (October). The average temperature rise at high latitude for the period from October to April, when the Arctic Ocean was covered with ice in the context of the current climate warming (1990–2022), is 4.2°C. A positive albedo relationship was found in patients with an increased risk of temperature increase. Approximately two-thirds of the temperature recurrence in the recovery months of the year can be explained by changes in latent heat inflows due to growth prospects. They reach the maximum values in quantity. Significant inflows of hidden income fall on the cold season. In the restoration of the months of the year, as shown in the work of G.V. Alekseev [Alekseev, Harlanenkova, Vyazilova, 2023], forms an active air exchange between the polar latitudes and breaks up into parts of the Northern Hemisphere.
The maximum rate of temperature increase in the period from 1990 to 2022 in October, exceeding the average annual growth rate by 1.7 times, is associated with increased latent heat inflows from the Arctic Ocean into the atmosphere. In the high latitudes of the Southern Hemisphere, the maximum rate of temperature increase was found in the month of May (end of autumn). It is also associated with an increase in turbulent flows of

Loginov V.F. The role of various factors in the Arctic growth of climate warming. *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2023, vol. 5, iss. 1, pp. 34–58. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2023.5.1.34.

осени). Она также связана с усилением турбулентных потоков скрытого тепла из Южного океана в атмосферу. Максимальная скорость роста температуры в Южном полушарии наступает также осенью на один месяц позже по сравнению с Северным полушарием.

В работе показано смещение максимальных скоростей роста температуры в северной полярной шапке на август–ноябрь, а в южной – на март–май (осень Южного полушария). Подобное смещение максимальных скоростей роста ранее обнаружено в широтном поясе 30–65° с.ш.

Ключевые слова: скорость потепления климата; циркуляция атмосферы; альбедные связи; притоки тепла; межширотный воздухообмен.

latent heat from the Southern Ocean into the atmosphere. The maximum rate of temperature increase in the Southern Hemisphere also occurs in autumn one month later than in the Northern Hemisphere.

The paper shows the shift of maximum temperature growth rates in the northern polar cap to August-November, and in the southern one to March-May (autumn of the Southern Hemisphere). A similar shift in the maximum growth rates was previously found in the latitudinal zone 30–65° N.

Keywords: rate of climate warming; atmospheric circulation; albedo bonds; heat inflows; interlatitudinal air exchange.

Введение

Большее по величине повышение температуры приземного воздуха в Арктике по сравнению с другими широтами Северного полушария или в полушарии в целом называется арктическим усилением [Davy, Chen, Hanna, 2018]. Рост температуры в последние 30–35 лет в арктических широтах в 5–7 раз выше, чем в других районах Северного полушария. Причины арктического усиления потепления климата рассматривались в многочисленных работах, но остаются к настоящему времени предметом острых дискуссий [Smith et al., 2019]. Остановимся на некоторых из них.

В одной из первых работ [Serreze, Francis, 2006] причиной арктического усиления было названо уменьшение альбедо поверхности высоких широт при сокращении площади ледового покрова в период современного потепления климата. В последующих работах [Алексеев, 2014; Алексеев и др., 2016; Alekseev et al., 2019; Cao et al., 2017] обращено внимание на роль притоков тепла и влаги из низких широт в арктическом усилении. В ряде работ [Pithan, Mauritsen, 2014; Алексеев, Вязилова, 2020] причиной арктического усиления названа нелинейность зависимости уходящей длинноволновой радиации от температуры, что приводит к меньшим потерям тепла в высокоширотных зонах земной поверхности. Нелинейная зависимость уходящей длинноволновой радиации от температуры приводит к повышению средней температуры при усилении меридионального переноса явного и скрытого тепла (МПТ), тогда как средние потери тепла с уходящей длинноволновой радиацией остаются неизменными [Алексеев, 2014; Alekseev et al., 2019]. Авторы также отмечают, что у экватора основной вклад в повышение температуры при относительной прозрачности атмосферы вносит парниковый эффект, тогда как у полюса меридиональные переносы явного и скрытого тепла.

Указанные точки зрения на природу арктического усиления получили свое развитие и в последующих работах [Bekryaev, Polyakov, Alexeev, 2010; Andry, Bintanja, Hazeleger, 2016; Evidence for…, 2017; Blackport et al., 2019; Blackport, Screen, 2020; Clark et al., 2021]. В работе [Andry, Bintanja, Hazeleger, 2016; Dai, 2021] показано, что альбедная обратная связь объясняет 86% изменчивости ледяного покрова в Арктике. Однако, как показано в работе [Mid-summer…, 2022] летом в Арктике 82% площади региона не испытывает изменений альбедо, лишь на 4% территории оно растет, а на 14% – падает. В результате потепления Арктика «зеленеет» (становится больше кустарников, из-за чего альбедо снижается). Скорость

понижения альбедо в июле может достигать до 3–9% в год.

Если принять во внимание оценки, приведенные в работе [Andry, Bintanja, Hazeleger, 2016], что вклад положительной альбедной связи обеспечивает 15–40% арктического усиления, то можно грубо оценить ее роль в изменении температуры в Арктике в холодное время года. Как показали наши оценки, средний рост температуры высоких широт (70–90° с.ш.) за период с октября по апрель, когда Северный Ледовитый океан покрыт льдом, составил 4,2°C за период с 1990 по 2022 год. Если положительная альбедная связь обеспечивает около трети арктического усиления, то её вклад в изменение температуры за последнее тридцатилетие составил около 1,4°C. Если учесть, что с 1952 по 2014 год альбедо подстилающей поверхности уменьшилась на величину 4–5% [Unraveling…, 2019], то уменьшение альбедо на 1% приводит к росту температуры приблизительно на 0,3–0,4°C. В этом случае оставшееся почти трехградусное увеличение температуры в полярной шапке за последние 30–35 лет может быть отнесено к влиянию других факторов; оценки их роли в разных работах различаются [Васюта, Мохов, Петухов, 1988; Serreze, Francis, 2006; Serreze, Barry, 2011; Семенов, Мохов, Латиф, 2012; Pithan, Mauritsen, 2014; Алексеев, 2014; Park et al., 2015; Cao et al., 2017; Blackport, Screen, 2020; Clark et al., 2021; Zhang et al., 2021; Семенов, Латиф, 2022].

В обзорной работе [Serreze, Barry, 2011] указано, что арктическое усиление является внутренним явлением в климатической системе, которое определяется множеством причин: сокращение площади льда, влияющего на потоки тепла и влагообмена между океаном и атмосферой, переносами тепла в атмосфере и океане, облачным покровом, содержанием водяного пара, притоком длинноволновой радиации к подстилающей поверхности, содержанием аэрозолей в атмосфере, загрязнением снега и льда и другими. Содержательный обзор роли различных факторов в формировании арктического усиления приведен в работе Г.В. Алексеевым с соавторами [Алексеев, 2014].

В ряде работ обсуждалась роль арктического усиления в изменениях климата других широтных зон и Северного полушария в целом [Petoukhov, Semenov, 2010; Семенов, Мохов, Латиф, 2012]. Однако, имеются и работы, где вообще показано полное отсутствие или незначительность их влияния на климат других широтных зон [Perlwitz, Hoerling, Dole, 2015; Meleshko et al., 2016; Blackport et al., 2019; Blackport, Screen, 2020]. Особенно детально вопрос воздухообмена между полярными широтами и остальной частью Северного полушария представлен в работах Г.В. Алексеева с соавторами [Алексеев, 1984; Алексеев, 2014; Алексеев и др., 2016; Алексеев, Вязилова, 2020; Алексеев, Харланенкова, Вязилова, 2023].

В одной из наших последних работ [Логинов, Микуцкий, Бровка, 2023] выполнен статический анализ тесноты связи местоположения ВТЗК и индекса меридиональной циркуляции Iм по А.Л. Кацу в годовом ходе с величинами коэффициентов линейного тренда температуры, характеризующими скорость потепления климата в различных широтных и долготных зонах Северного и Южного полушария. Он показал, что более тесные связи этих глобальных характеристик атмосферной циркуляции обнаружены с величинами линейных трендов температуры в различные месяцы года в южных тропиках по сравнению с северными.

Самые тесные связи трендов температуры в разные месяцы года в северной полярной шапке обнаружены с изменениями трендов температуры в южных тропиках Атлантического океана, что, вероятно, определяется влиянием переноса тепла течениями в этом океаническом регионе в полярную область [Логинов, Микуцкий, Бровка, 2023].

Особенно детально вопрос воздухообмена между полярными широтами и остальной частью Северного полушария рассмотрен в последние годы в работах Г.В. Алексеева с соавторами [Алексеев, 1984; Алексеев, 2014; Алексеев и др., 2016; Alekseev et al., 2019; Алексеев, Вязилова, 2020; Алексеев, Харланенкова, Вязилова, 2023].

В одной из последних работ Г.В. Алексеева и др. [Алексеев, Харланенкова, Вязилова, 2023] показано, что перенос тепла и влаги в атмосфере ответствен за формирование значительной части межгодовой изменчивости

приповерхностной температуры воздуха (ПТВ) в Арктике. В свою очередь, холодный арктический воздух, поступающий в умеренные, а зачастую и в тропические широты, влияют на их среднюю температуру. Отношение изменчивости средней поверхностной температуры в арктических и субарктических широтах и более низких широтах, оцениваемое среднеквадратическими отклонениями (СКО) указанных широтных зон, принято в работе [Алексеев, Харланенкова, Вязилова, 2023] мерой влияния воздушного обмена на ПТВ каждой области. В указанной работе взяты такие варианты сопряженных зон; 1) 90–60° с.ш. и 60–0° с.ш.; 2) 90–70° с.ш. и 70–0° с.ш.

Отношения модельных и фактических значений для исходных рядов СКО каждого месяца года каждой пары выделенных областей различаются. Оказалось, что обмен при расширении полярной области от 70° до 60° с.ш. охватывает более низкие широты. Приведенные в работе [Алексеев, Харланенкова, Вязилова, 2023] результаты показали, что в воздухообмен в октябре вовлечены самые низкоширотные области Северного полушария; для первого варианта это тропические широты, вплоть до 18° с.ш., а для второго – вплоть до южной части умеренных широт – 48° с.ш.

В другие месяцы холодного времени года в полярных широтах (ноябрь–апрель) междуширотный воздухообмен охватывает пояс 90–25° с.ш., а в летние месяцы – 90–47° с.ш.

Небольшое снижение широты точек пересечения модельных и фактических отношений СКО средней приповерхностной температуры воздуха полярных областей и областей, прилегающих к ним с юга, означает, что весной и, особенно, осенью междуширотный воздухообмен охватывает более значительный широтный пояс, чем в теплое время года (июнь–сентябрь), а если проводить сравнение с осенним воздухообменом, то и в зимние месяцы года.

Тропические широты, таким образом, являются нижней границей распространения холодного воздух из широтного пояса 60–90° с.ш. Самая низкая тропическая широта, до которой распространяется холодный воздух, выявлена для исходных рядов среднеквадратических отклонений, содержащих, в том числе, и положительную трендовую компоненту в последнее тридесятилетие. Ее наличие может означать влияние современного потепления климата на усиление воздухообмена между высокими и низкими широтами. Минимум широты, до которой распространяется атмосферный воздух от широтного пояса 70–90° с.ш. наблюдается в октябре. Рассмотрим роль циркуляции атмосферы в арктическом усилении детально.

Материалы и методика исследований

В работе использовались данные проекта NCEP/NCAR Reanalysis (https://pls.noaa.gov) по температуре воздуха на уровне барической поверхности 1000 гПа при разрешении градусной сетки 2,5°:2,5°. Выбор периода исследований – 1990–2022 годы – определялся следующими соображениями:

– для этого периода характерна самая высокая скорость роста температуры по сравнению с другими равными по длительности периодам;

– Международная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК) сделала следующий вывод: «… в высшей степени вероятно (extremely likely, 95–100%), что влияние хозяйственной деятельности является доминирующей причиной наблюдаемого с середины XX столетия» [IPCC. Climate…, 2013], хотя в работе [Семенов, Латиф, 2022] указано, что «арктическое потепление последних трех десятилетий хорошо воспроизводится в ансамблевых экспериментах с МОЦА с использованием данных HadISST 1.1, в то время как потепление середины XX века в Арктике не может быть воспроизведено».

Величины линейных трендов температуры для каждого месяца года получены с использованием стандартной формулы: $y = \alpha x + b$, где α – коэффициент линейного тренда.

Результаты исследований

Циркуляция атмосферы и океана, как факторы арктического усиления. Роль тропиков в арктическом усилении

Вклад воздухообмена в усиление тренда температуры в различные месяцы года приведен

на рисунке 1 [Алексеев, Харланенкова, Вязилова, 2023]. На этом же рисунке представлены вычисленные нами тренды зонально-осредненных месячных температур воздуха в широтном поясе 70–90° с.ш. на уровне барической поверхности 1000 гПа за период с 1990–2022 годов.

Из рисунка 1 следует, что усиленный воздухообмен способствует усилению скорости роста среднеширотной температуры в высоких широтах. Коэффициент корреляции (r) вклада воздухообмена полярных и прилегающими с юга широт с величинами тренда температуры в различные месяцы года в полярной шапке (70–90° с.ш.) составил 0,92, что свидетельствует о важной роли циркуляции атмосферы в арктическом усилении.

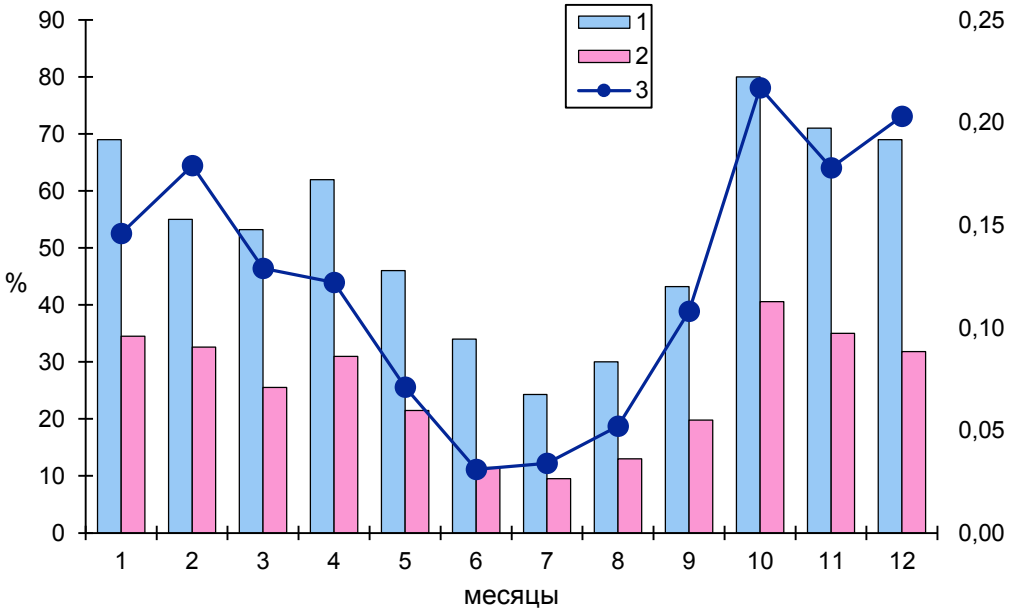


Рисунок 1. Вклад воздухообмена (в %) между областями 60–90° с.ш. и 0–60° с.ш. (1), областями 70–90° с.ш. и 0–70° с.ш. (2) по данным реанализа ERA5 за 1989–2020 годы; коэффициенты линейных трендов стандартизированных рядов температур зонально-осреднённых месячных температур воздуха полярной области (70–90° с.ш.) на уровне барической поверхности 1000 гПа за период 1990–2022 годы (3).

Figure 1. Contribution of air exchange (in%) between areas 60–90° N and 0–60° N (1), areas 70–90° N and 0–70° N (2) according to ERA5 reanalysis for 1989–2020; coefficients of linear trends of standardized temperature series of zonal-averaged monthly air temperatures in the polar region (70–90° N) at the baric surface level of 1000 hPa for the period 1990–2022. (3).

Для весенних месяцев года характерен ряд особенностей в изменении показателей общей циркуляции атмосферы:

1. Отношение (I) значений индексов зональной циркуляции ($I_з$) к меридиональной ($I_м$), хотя и выше, чем в другие месяцы года, но уступает осеннему соотношению индексов приблизительно в 1,5 раза [Кац, 1960].

2. Экваториальное местоположение ВТЗК при своей годовой миграции (апрель, ноябрь).

Об усилении теплообмена высоких и низких широт весной свидетельствует и работа [Виноградова, 2018], где показано, что наибольшая повторяемость волн тепла и холода на территории России со второй половины 20-го столетия приходится именно на весну.

В наших работах [Логинов, Лысенко, 2019] было установлено, что в изменении среднегодовой частоты арктических вторжений в различных секторах Северного полушария в период с 1899 по 2017 год кроме трендовой компоненты содержится мощная квазипятидесятилетняя компонента. Ее удвоенная амплитуда в % от изменчивости продолжительности арктических вторжений в интервале ±2 среднеквадратических отклонений

(σ) исходного ряда изменяется от 60% (Атлантический сектор) до 43% (Тихоокеанский сектор). В изменении величин продолжительности арктических вторжений в Европейском секторе доминирует квазитридцатилетняя составляющая (28–32 года). Ее удвоенная амплитуда составляет только 30%.

Последний минимум в изменчивости повторяемости арктических вторжений в Тихоокеанском, Атлантическом, Американском, Дальневосточном и Сибирском секторах наблюдался в конце 80-х годов прошлого столетия, а максимум в период с 2010–2015 годов, после которого заметно либо небольшое уменьшение, либо стабилизация повторяемости арктических вторжений (2015–2017 годы). Трендовая составляющая по мощности уступает квазипятидесятилетнему колебанию и имеет ярко выраженный положительной знак в период с 1899 по 2017 год только в Тихоокеанском и Атлантическом секторах.

Анализ показал, что на большей части периода современного системного потепления климата (1985–2022 годы) происходит отчетливый рост числа и увеличение продолжительности арктических вторжений в подавляющем числе секторов Северного полушария, что свидетельствует о интенсификации воздухообмена в Северном полушарии во время потепления климата.

При потеплении климата в полярных широтах происходит усиление муссонной циркуляции зимой и ослабление ее летом, поскольку полярная шапка зимой становится теплее и градиент температуры «Евразийский материк – Северный Ледовитый океан» (СЛО) становится больше зимой. Летом теплая полярная шапка приводит к тому, что градиент температуры «СЛО–материк» становится меньше и летний муссон снижает свою интенсивность. При этом в оба сезона создаются условия для усиления циклоничности над СЛО и антициклоничности над материками. Последняя приводит к увеличению повторяемости засух на материках Северного полушария.

При росте температуры СЛО увеличивается влагосодержание воздушных масс, что является основной причиной возрастания количества осадков в высоких широтах Северного полушария. Этот факт подтвержден модельными расчетами и данными наблюдений [IPCC. Climate…, 2013]. Известно также, что Арктическое усиление потепления климата приводит к уменьшению контрастов температуры «экватор–полюс», что приводит к уменьшению интенсивности переносов тепла и влаги с океанов вглубь материка. В таких условиях происходит увеличение повторяемости на материках процессов блокирования и, как следствие. увеличению повторяемости засух, что, в действительности, и наблюдается на Евразийском континенте в последние полвека.

Это особенно ярко проявляется в изменении климата на территории Беларуси в последние 30 лет. В период с 1992 по 2023 год повторяемость засух на территории Беларуси увеличилась более, чем в два раза. Характерно, что значительная часть засух охватывала почти всю территорию Беларуси, а продолжительность засух превышала два месяца. Так, крупные засухи наблюдались в 1992, 1994, 1999, 2002, 2003, 2007, 2010, 2021, 2023 годах. Засуха 1999-го года началась в мае и продолжалась 82 дня, а засуха 2002-го года – 140 дней. Следует отметить, что последние три десятилетия развивалось потепление летнего типа.

Рассмотрим особенности изменения зональной и меридиональной циркуляции в годовом ходе.

Наиболее полно этот вопрос рассмотрен в работе А.Л. Каца [Кац, 1960] в конце 50-х – начале 60-х годов. Спустя тридцать лет в работе Г.В. Алексеева [Алексеев, 2014] установлено два устойчивых типа крупномасштабного распределения характеристик циркуляции атмосферы, основные особенности которых аппроксимируются первыми тремя гармониками. Последние тесно связаны с распределением суши и океанов.

Переход от одного типа циркуляции к другому контролируется зональной и меридиональной разностями температуры «океан–суша» и «экватор–полюс», которые определяются притоками тепла от Солнца в годовом ходе. Весной и осенью происходит наиболее быстрое изменение притоков солнечной радиации в атмосферу в ее годовом ходе, а скорость генерации кинетической энергии в атмосфере достигает максимальных значений [Алексеев, 2014].

Притоки солнечной радиации на подстилающую поверхность в низких широтах через изменение интенсивности вертикальной ячейки Гадлея формируют изменение климата этих широт. Существуют и другие особенности в изменении притоков солнечной радиации и циркуляции атмосферы и, как следствие, температуры в годовом ходе. Эффект равноденствий и солнцестояний в изменении величин линейного тренда температуры в период с 1990 по 2022 год установлен нами для приэкваториальных широт Северного и Южного полушарий [Логинов, Микуцкий, Бровка, 2023]. Причина обнаруженного эффекта связана с годовыми изменениями высоты Солнца. Притоки прямой и рассеянной солнечной радиации в весеннее равноденствие выше, чем летнее и зимнее солнцестояния и осеннее равноденствие. Это приводит к тому, что в приэкваториальных широтах температура в годовом ходе имеет два максимума и два минимума. Здесь формируется особый тип климата по сравнению с другими широтами, для других широт характерен один годовой максимум и минимум температуры. Такой характер изменения притоков солнечной радиации в приэкваториальной зоне отражается на характере атмосферной циркуляции в низких широтах Земного шара – интенсивности ячейки Гадлея. Как установлено в многочисленных работах низкие широты являются основным источником тепла для остальной части Земного шара.

Диаграмма годового хода зонального и меридионального контрастов температуры в атмосфере по данным работы [Алексеев, 1984] содержит четыре характерные точки. Две из них соответствуют экстремальным условиям зимы (январь) и лета (июль) и две точками пересечения траекторий разностей температуры «океан–суша» ($\Delta_\lambda T$) и «экватор–полюс» ($\Delta_\varphi T$). Две точки пересечения траектории приходятся на весну (апрель–май) и осень (сентябрь) и соответствуют месяцам года, когда «обнуляются» меридиональные контрасты температуры «океан–суша». Это означает, что вблизи равноденствий возмущающее воздействие океана и суши достигает минимумов и происходит уменьшение вклада первых трех волн в пространственном распределении температуры Северного полушария. Таким образом, анализ притока солнечной радиации в годовом ходе и циркуляции атмосферы позволил автору работы [Алексеев, 1984] заключить, что весной и осенью осуществляется переход от одной устойчивой структуры крупномасштабного распределения характеристик состояния атмосферы к другой. Этот переход осуществляется при интенсивном изменении притоков энергии в атмосферу, как от Солнца, так и океана, что будет показано ниже.

В последних работах Г.В. Алексеева с соавторами [Алексеев, Вязилова, 2020] показано, что климатические изменения в низких широтах оказывают наибольшее влияние осенью на меридиональный перенос в весенний сезон и зональный перенос в холодную часть года, особенно в марте, с запаздыванием два года. Коэффициент корреляции среднемесячной температуры воздуха в районе водосборов Оби, Лены и Енисея с циркуляцией атмосферы оказались наибольшими в марте и апреле.

Представленные выше объяснения особенностей изменений зональной и меридиональной циркуляции атмосферы в годовом ходе в работе [Алексеев, 1984] в определенной мере перекликаются с представлениями А.Л. Каца [Кац, 1960].

Отдельным дискуссионным вопросом при оценке различных факторов арктического усиления является чувствительность климатической системы к внешним воздействиям [Васюта, Мохов, Петухов, 1988; Дымников, Филатов, 1990; Мохов и др., 1992; Мохов, 1993]. В работе [Мохов и др., 1992] установлен рост и влияние на климат меридиональной составляющей переноса тепла в результате роста вихревой активности в атмосфере при потеплении климата. В работе [Мохов и др., 1992; Park et al., 2015; Goss, Feldstein, Lee, 2016] установлена связь широтного распределения дисперсий среднезональных температур с полярным усилением. Источники интенсификации циркуляции находятся в низких широтах, откуда тепло переносится в полярные области [Алексеев, 2014; Park et al., 2015; Goss, Feldstein, Lee, 2016]. Исследования в этом направлении представляют отдельный интерес, поскольку они позволяют понять существенные различия в характере проявления действий различных факторов в изменении климата в разных регионах Земного шара.

Принимая во внимание результаты исследований воздухообмена в Северном полушарии, представленные в работах Г.В. Алексеева и группы его коллег [Алексеев, 1984; Алексеев, 2014; Алексеев и др., 2016; Alekseev et al., 2019; Алексеев, Вязилова, 2020; Алексеев, Харланенкова, Вязилова, 2023], а также оценки скорости роста температуры в различные месяцы года в период современного потепления климата (1990–2022 годы), представленные в наших последних работах [Логинов, 2021; Логинов, Микуцкий, Бровка, 2023], можно заключить, что ключевыми процессами регулирования изменения скорости потепления в разные месяцы года в различных регионах Земного шара, включая явление арктического усиления, являются процессы тепло- и влагообмена между океаном и атмосферой в годовом цикле, а также многолетнем ходе.

Роль внешних воздействий на климат рассматривался в многочисленных работах [Васюта, Мохов, Петухов, 1988; Мохов и др., 1992; Мохов, 1993; Логинов, 2012; IPCC. Climate…, 2013; Федоров, 2018; Логинов, Лысенко, 2019; Теоретические и экспериментальные…, 2019; Логинов, 2021]. Многолетнее увеличение температуры, как в арктических широтах, так и на всем Северном полушарии в последние 35–40 лет чаще приписываются радиационному форсингу парниковых газов. Дополнительно к радиационному форсингу парниковых газов считают радиационный форсинг аэрозолей естественного и антропогенного происхождения [Логинов, 2012; IPCC. Climate…, 2013; Теоретические и экспериментальные…, 2019; Логинов, Лысенко, 2019; Логинов, Бровка, 2022]. Незначительная часть радиационного форсинга приходится на изменение яркости солнечного диска в результате появления на Солнце темных (солнечные пятна) и светлых образований (факелы и кольца вокруг пятен) с 11-летней и квазивековой цикличностью (солнечная активность), а также изменениями орбитальных параметров Земли [Логинов, 2012; Федоров, 2018]. Потепление климата в последние годы (1994–2022 годы) в теплое время усилилось в результате очищения атмосферы от вулканического аэрозоля (последнее климатически значимое извержение вулкана Пинатубо произошло в 1991 году), а также проведения природоохранных мероприятий и усовершенствования технологий в различных секторах экономики. Это особенно заметно в Западной Европе. Определенный вклад в снижении аэрозольного загрязнения в Европе внесло снижение производства в республиках бывшего Советского Союза [Логинов, Лысенко, 2019; Логинов, 2021]. Еще раньше период очищения атмосферы от вулканического аэрозоля наблюдался с 1914 по 1945 год. Это очищение атмосферы было одним из факторов потепления климата в теплое время года в 30–40-е годы 20-го столетия [Логинов, 2012; Логинов, 2021].

Скорость роста температуры в высоких широтах Северного и Южного полушарий в годовом ходе как характеристика высокоширотного усиления потепления климата

В работе [Логинов, Микуцкий, Бровка, 2023] нами было показано, что отношения величины трендов температуры в различные месяцы года (скорость потепления) в высоких широтах Северного полушария (70–90° с.ш.) в летне-осенний период (июль–ноябрь) к величинам трендов температуры в зимне-весенний период (январь–май) возрастает от 1,26 (0–20° с.ш.) до 2,83 (70–90° с.ш.). Максимальная скорость роста температуры наблюдается в октябре, а минимальная в июне–июле.

В Южном полушарии годовой ход отношений величины трендов температуры для холодного (V, VI, VII, VIII, IX) и теплого времени года (X, XI, XII, I, II, III) изменяется следующим образом: 0–25° ю.ш. – 1,18; 10–20° ю.ш. – 1,63; 30–65° ю.ш. – 1,40; 70–90° ю.ш. – 1,98. Это свидетельствует о том, что антарктическое усиление в 1,4 раза слабее, чем арктическое.

Скорость потепления климата в арктической и антарктической полярной шапке в различные месяцы года за период с 1990 по 2022 год представлена на рисунке 2. Из рисунка 2 следует, что самая большая скорость роста температуры в северной полярной шапке приходится на холодное время года и особенно в октябре (рисунок 2а), в южной полярной шапке оно характерно для осенних (март–май) и зимних месяцев (июнь–август), а также первой половины весны (сентябрь–октябрь); период самой малой скорости роста температуры в южной полярной шапке занимает всего три теплых месяца года (ноябрь, декабрь и январь), на которые

приходится пик короткого летнего сезона (рисунок 2б).

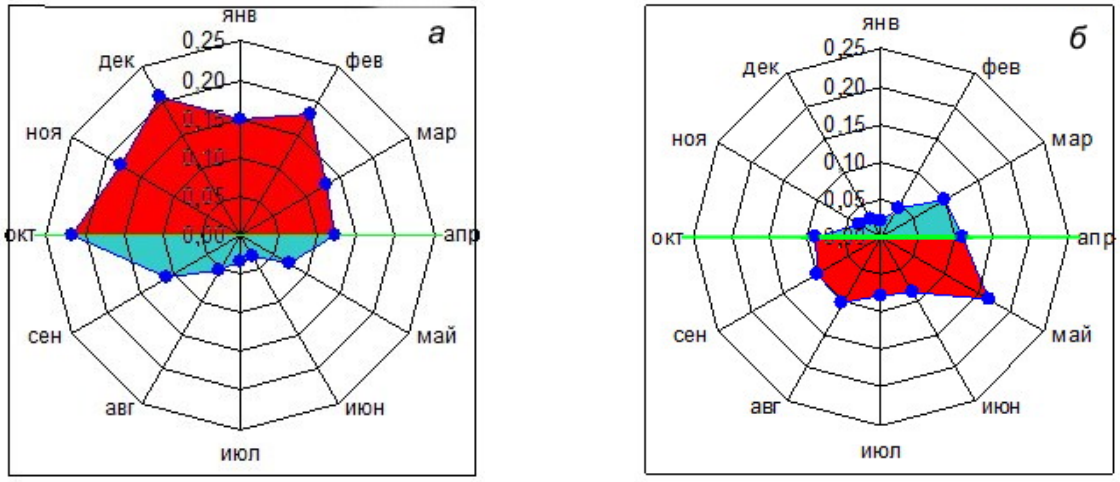


Рисунок 2. Тренды среднемесячных температур на изобарической поверхности 1000 гПа в северной (а) и южной (б) полярных областях. Период наблюдений – 1990–2022 годы.

Figure 2. Trends in average monthly temperatures on the isobaric surface of 1000 hPa in the northern (a) and southern (b) polar regions. The observation period is 1990–2022.

Таким образом, изменения скорости потепления климата в высокоширотных зонах Северного и Южного полушарий в годовом ходе имеют как общие черты, состоящие в увеличении скорости потепления в холодное время года и особенно осенью (октябрь – северное и май – южное), так и различия: а) меньшие по величине скорости потепления климата в Южном полушарии (Антарктида) во все месяцы года; б) запаздывание на 1 месяц скорости максимального потепления (Северное полушарие – середина осени, Южное полушарие – конец осени); в) большая выраженность осеннего максимума в изменении скорости потепления климата осенью (октябрь) по сравнению с весной (апрель).

Установленные сходства и различия в изменении скорости потепления климата в различные месяцы года в высоких широтах Северного и Южного полушарий требуют детализации для разных долготных секторов, а также Западного и Восточного полушарий в целом.

Изменения скорости потепления в различные месяцы года для разных секторов высокоширотной зоны (70–90° с.ш.) представлены на рисунке 3. В верхней части рисунка 3 представлены величины линейных трендов температуры высокоширотной зоны для первого естественного синоптического района Б.П. Мультановского и различных его частей. Из рисунка 3 следует, что максимальная скорость потепления климата приходится на период с октября по февраль. Абсолютный максимум скорости роста температуры приходится на октябрь, а минимальная скорость на апрель–сентябрь, то есть теплое время года. Для другого сочетания долготных секторов характерны высокие значения трендов температуры дополнительно в марте–апреле, то есть появление другого равноденственного максимума в изменении скорости потепления; формируется двухгорбая кривая в изменении скорости потепления в годовом ходе: максимумы приходятся на середину осени и весны. При этом осенний максимум выражен особенно в октябре.

Минимальные значения в изменении величины трендов в годовом ходе сдвигаются на март–сентябрь. Это означает, что в долготном секторе влияния Атлантического океана (первый естественный район Б.П. Мультановского) весенний максимум скорости потепления климата не выражен.

Усиление весеннего максимума в изменении величин трендов температуры связано с включением в расчет данных наблюдений температуры в центральной части Восточного полушария, включающей акваторию Гренландского моря и моря Баффина, то есть

усиление весеннего максимума характерно в большей мере в Тихоокеанском секторе.

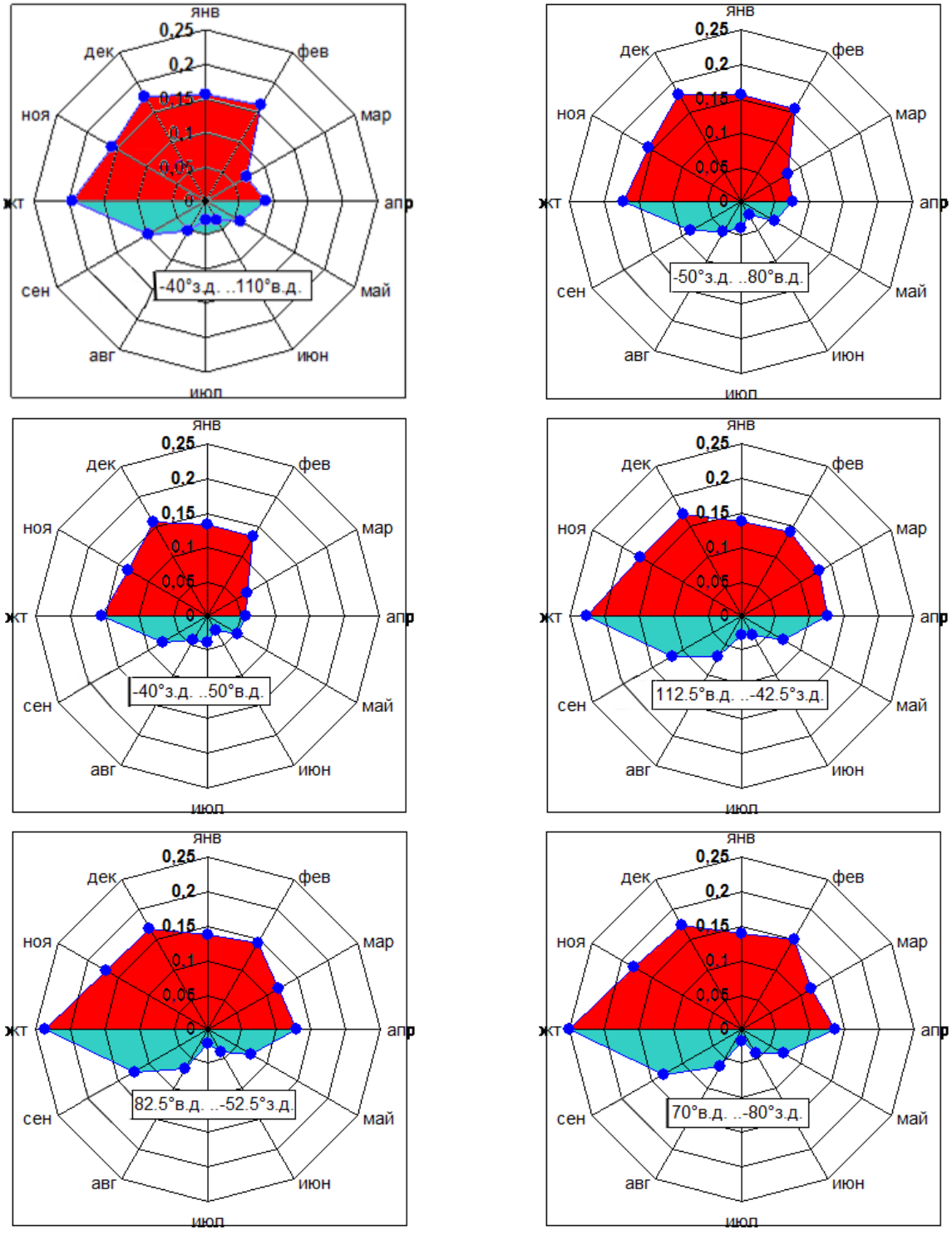


Рисунок 3. Тренды среднемесячных температур на изобарической поверхности 1000 гПа в северной полярной области (70–90° с.ш.) для разных долготных секторов за период с 1990 по 2022 год.
Figure 3. Trends in mean monthly temperatures on the isobaric surface of 1000 hPa in the northern polar region (70–90° N) for different longitudinal sectors for the period from 1990 to 2022.

Величины трендов температуры высоких широт Южного полушария в различные месяцы года для разных долготных секторов представлены на рисунке 4. Из рисунка 4а

следует, что величины трендов температуры в Восточном полушарии имеют наибольшие значения весной и осенью, при этом абсолютные максимумы величин трендов температуры, как и в Северном полушарии, приходятся на октябрь и май. Изменения величины трендов температуры напоминают эллипс, вытянутый в направлении равноденственных сезонов года. В Западном полушарии характер изменения величины трендов температуры другой: эллипсоидность менее выражена, а в теплое время года (ноябрь–февраль) величины трендов температуры достигают минимальных значений (в ноябре–январе отрицательных значений).

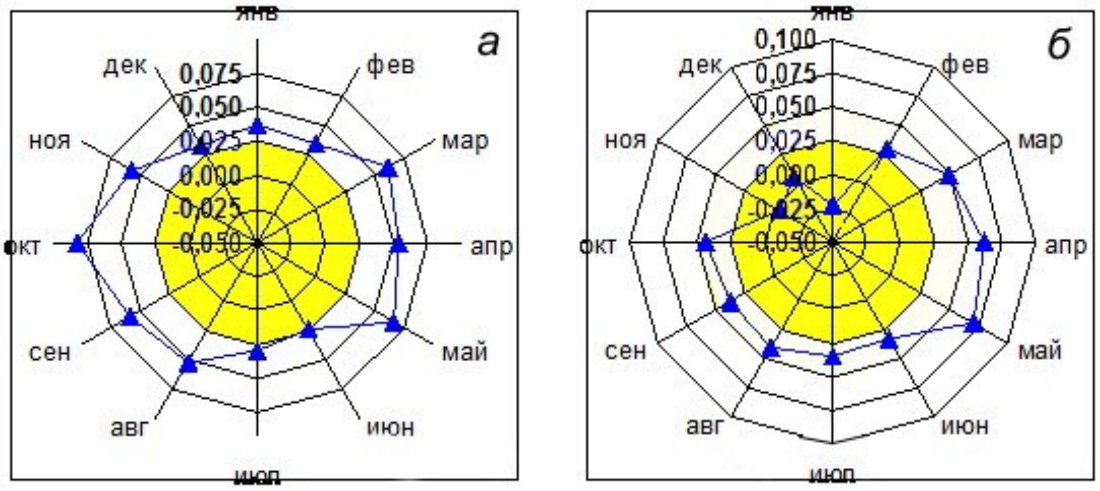


Рисунок 4. Тренды среднемесячных температур на изобарической поверхности 1000 гПа в южной полярной области (70–90° ю.ш.) для разных долготных секторов:
а) 0–170° в.д. (а); б) 172,5° в.д. – 2,5° з.д. Период наблюдений – 1990–2022 годы.
Жёлтый круг очерчивает величины линейных трендов < 0,025.

Figure 4. Trends of mean monthly temperatures on the isobaric surface of 1000 hPa in the southern polar region (70–90° S) for different longitudinal sectors:
a) 0–170° E; b) 172.5° E – 2.5° W.L. The observation period is 1990–2022.
The yellow circle outlines linear trend values < 0.025.

Таким образом, в Западном полушарии максимальные значения величин трендов приходятся на осень (апрель–май), а наименьшие на конец весны (ноябрь), декабрь и январь (лето) Южного полушария. Из рисунка 4б и 2б следует, что изменения скорости потепления климата в полярной шапке океанического Западного полушария в годовом ходе почти полностью согласуются с изменениями скорости потепления всего Южного полушария, тогда как для изменения скорости потепления климата в Восточном полушарии (рисунок 4а) характерно эллипсоидное распределение скорости потепления климата в годовом ходе с основным максимумом, приходящимся на середину весны Южного полушария, и вторичным максимумом осенью Южного полушария (март–май). Это может свидетельствовать о том, что термодинамические условия океанического Западного полушария (Атлантический сектор Мирового океана) определяют генеральные особенности изменения скорости потепления климата в полярной шапке Южного полушария в годовом ходе (рисунок 2б), то есть являются главным генератором, формирующим величину скорости потепления климата в различные месяцы года.

В высоких широтах Северного и Южного полушарий генеральные особенности изменений температуры в годовом ходе в последние годы (1990–2022) состоят в следующем: 1) максимальная величина трендов приходится на холодное время года и особенно осенние месяцы (октябрь в Северном и май в Южном полушариях); 2) минимальная величина трендов совпадает с теплым временем года; в Южном полушарии оно занимает всего три месяца года (ноябрь, декабрь,

январь) в Западном полушарии, а в Восточном – декабрь, январь, февраль.

Физико-географические и гидрометеорологические условия Западного и Восточного полушарий существенно различаются. Для Восточного полушария характерна большая материковость; в нем расположен самый протяженный на Земном шаре Евразийский материк, черты влияния которого прослеживаются в изменении скорости потепления климата и в целом гидрометеорологического режима в различные месяцы года всего Северного полушария. Разные начальные условия, на которые накладываются внешние воздействия, несомненно, оставляют свой отпечаток в характере изменений скорости потепления климата. Западное полушарие имеет более значительную океаничность по сравнению с Восточным. В западной части Восточного полушария (Европа и Западная Сибирь) и в восточной части Западного полушария велико влияние на климат теплых течений системы Гольфстрим.

Максимальная скорость роста температуры в полярных шапках Северного и Южного полушарий во второй половине осени, вероятно, имеет одну и ту же причину.

Такой причиной является в первую очередь тепло- и влагообмен между океаном и атмосферой.

В работе [Taylor et al., 2018] представлены оценки потоков тепла на основе данных дрейфующих станций и спутниковых измерений; интерпретация осуществлялась с помощью численных климатических моделей. Наибольшие потоки скрытого потока тепла в годовом ходе приходятся на сентябрь и октябрь и холодное время года (ноябрь–март).

Наблюдаемая потеря морского льда приводит к увеличению обмена массой, энергией и импульсом между Северным Ледовитым океаном и атмосферой. Важнейшим компонентом теплообмена являются турбулентные потоки, которые регулируются вертикальными градиентами температуры, влажности, скорости ветра и шероховатостью подстилающей поверхности в Арктике. Турбулентные потоки реагируют на изменения радиационных потоков и адвекцию тепла в атмосфере и океане. Обмен энергией между атмосферой и подстилающей энергией в свою очередь отражается на энергетическом балансе морского льда, облачности, температуре и влажности пограничного слоя и, как следствие, циркуляции атмосферы и океана. В совокупности указанные процессы оказывают влияние на пространственные временные изменения климата. В работах [Serreze, Barry, 2011; Алексеев, 2014; Alekseev et al., 2019] приводятся современные знания о турбулентных потоках тепла в Северном Ледовитом океане и их влиянии на климат. Авторы пришли к выводу, что турбулентные потоки тепла оказывают большое влияние на климат Арктики.

Скрытое тепло, которым обладает содержащийся в воздухе водяной пар, при его конденсации и сублимации (ледообразовании) превращается в явное тепло и расходуется на нагревание воздуха.

В работе [Алексеев, 2014] показано, что основной поток явного и скрытого тепла в зимний период поступает через атлантическую часть 70-й параллели от 0° до 80° в.д. в слое от поверхности до 750 гПа с максимумом на 1000 гПа. Колебания притока тепла через 70° параллель в долготном поясе от Гринвичского меридиана до восточной границы Западной Сибири ответственны за более, чем 40% изменений средней по области 70–90° с.ш. приповерхностной зимней температуры в период наибольшего роста температуры с 1997 по 2014 год.

Проведенные нами исследования скорости роста температуры в полярной шапке (70–90° с.ш.) показывают, что наибольшая скорость роста температуры приходится на октябрь–январь, причем, абсолютный максимум скорости роста температуры приходится на октябрь, что позволяет расширить область наибольшего влияния притоков явного и скрытого тепла на температуру полярной шапки на большую часть осеннего периода (октябрь–ноябрь), где влияние потоков тепла на скорость

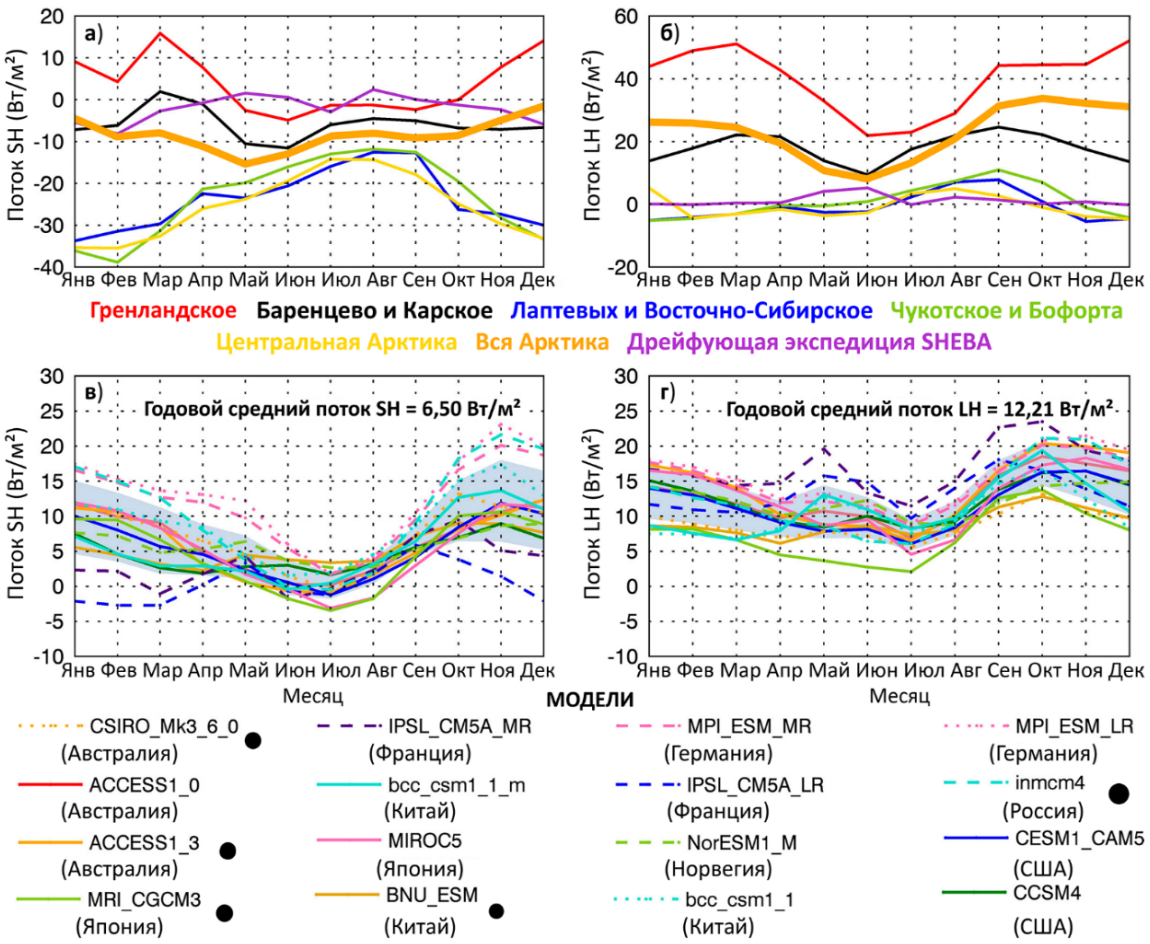


Рисунок 5. Полученные со спутников годовые циклы потоков явного тепла SH (а) и скрытого тепла LH (б) в Арктике и её регионах (см. легенду), усредненные за период 2003–2015 годы. Оранжевая линия – вся область Северного Ледовитого океана. Фиолетовый цвет – годовые циклы потоков SH и LH, измеренных в ходе экспедиции SHEBA. Современный годовой цикл потоков SH (в) и LH (г). Значения были усреднены по всем ячейкам расчётной сетки, расположенным не на суше, в области севернее 60° с.ш. по данным ансамбля климатических моделей CMIP5, включающего 16 моделей, с использованием сценария усиления радиационного форсинга RCP8.5. Значения в (в) и (г) представляют собой годовые, усредненные по ансамблю потоки SH и LH. Современный период определяется как первые 20 лет симуляции (здесь 2006–2026 годы).

P.S. Выделены модели, показывающие только один максимум потока тепла в течение года.

Figure 5. Satellite-derived annual cycles of apparent heat fluxes SH (a) and latent heat fluxes LH (b) in the Arctic and its regions (see legend), averaged over the period 2003–2015. The orange line is the entire Arctic Ocean region. Purple colour – annual cycles of SH and LH fluxes measured during the SHEBA expedition. Modern annual cycle of SH fluxes (c) and LH fluxes (d). The values were averaged over all non-land grid cells in the region north of 60° N using data from the CMIP5 climate model ensemble of 16 models, using an amplification scenario. 16 models, using the RCP8.5 radiative forcing enhancement scenario. The values in (c) and (d) are annual, ensemble-averaged SH and LH fluxes. The modern period is defined as the first 20 years of the simulation (here 2006–2026).

P.S. Models showing only one heat flux maximum during the year are highlighted.

роста температуры оказывается соизмеримым с зимним периодом. Атмосферные притоки явного и скрытого тепла оказались наибольшими начиная от Гренландского до Восточно-Сибирского моря [Taylor et al., 2018]. Однако, годовой ход в изменении притоков явного и

скрытого тепла имеет ряд пространственно-временных особенностей (рисунок 5) [Taylor et al., 2018]. Приток явного тепла в атмосферу в Гренландском море наибольший в холодное время; он начинает увеличиваться с осени, достигая максимальных значений в марте. На остальной акватории Северного Ледовитого океана в большую часть года поступление явного тепла происходит из атмосферы в океан.

Особенно существенные притоки тепла из атмосферы в океан происходят в холодное время года в восточной части Северного Ледовитого океана (море Лаптевых, Восточно-Сибирское, Чукотское и море Бофорта). Потоки явного тепла из атмосферы в океан в Западной части океана во всей Арктике в течение года изменяются незначительно; их максимум приходится на вторую половину весны – начало лета.

Исследование показало, что уменьшение скорости потепления климата весной по сравнению со второй половиной осени (сентябрь–ноябрь) особенно характерно для более ледовитой части СЛО в Восточном полушарии (рисунок 3). В морях Лаптевых, Восточно-Сибирском, Чукотском и Бофорта весной происходит меньшее выделение скрытого тепла из океана (рисунок 5). В западном секторе Северного Ледовитого океана (Гренландское море) потоки явного и скрытого тепла из океана в атмосферу весной даже несколько больше, чем осенью, а в переходных морях (Баренцевом и Карском) потоки скрытого тепла из океана в атмосферу весной и осенью соизмеримы, а потоки явного тепла составляют всего несколько Вт/м^2.

В остальные месяцы года потоки явного тепла направлены от атмосферы в океан.

Вторичный весенний (март–апрель) максимум скорости потепления климата в западном части Северного Ледовитого океана связан с увеличением притоков в атмосферу в этот период.

Потоки скрытого тепла в атмосферу наблюдаются практически на всей акватории Северного Ледовитого океана. Исключение составляют Чукотское море и море Бофорта, а также Центральная Арктика в холодное время года (ноябрь–март). На остальной акватории Северного Ледовитого океана притоки скрытого тепла превышают 10 Вт/м^2 во все месяцы года, достигая максимальных значений в холодное время года (сентябрь–апрель), причем, в сентябре–октябре притоки скрытого тепла из океана в атмосферу на акватории Северного Ледовитого океана превышают притоки тепла в другие месяцы холодного времени года (ноябрь–март). Модельные оценки притоков скрытого тепла из Северного Ледовитого океана в атмосферу для самого крайнего сценария RCP 8,5 (конец 21 столетия) в сентябре–октябре оказались более значительными по сравнению с притоками тепла зимой и весной, чем в настоящее время [Taylor et al., 2018].

Эти результаты позволяют предсказать еще более высокую скорость роста температуры в полярной шапке в сентябре–октябре по сравнению с другими месяцами холодного полугодия в ближайшие годы и еще большее смещение скорости потепления климата на осень–начало зимы.

Таким образом, скорость роста температуры в холодное время года (октябрь–апрель) в полярных широтах (70–90° с.ш.) определяется в основном притоками скрытого тепла, поступающего от Северного Ледовитого океана в атмосферу. Максимальная скорость роста температуры высоких широт в октябре месяце отвечает максимальному притоку скрытого тепла в период современного системного потепления климата в последние 35–40 лет.

Оценка антарктического усиления потепления климата сопряжена с еще большими трудностями. Исходя из полученных нами предварительных результатов [Логинов, Микуцкий, Бровка, 2023], антарктическое усиление меньше арктического, как минимум, на 40%. Рассмотрим результаты исследований энергообмена между океаном и атмосферой в высоких широтах Южного полушария.

В работе [Worby, Allison, 1991] показано, что наличие обширных участков тонкого льда в прилегающих к Антарктиде акваториях оказывает значительное влияние на энергообмен между океаном и атмосферой. Это влияние исследуется авторами с помощью модели энергетического баланса в случае тонкого льда

для типичных осенних ледовых и климатических условий. Используемая модель сочетается с эмпирической параметризацией турбулентных потоков открытых от льда акваторий Южного океана. Результаты моделирования для рассмотренного в работе размера льдин показали, что при 80%-ом покрытии тонким льдом турбулентные потери тепла могут быть больше, чем от открытых водных акваторий. При концентрации льда менее 50% потери тепла в процессе турбулентного обмена океана и атмосферы практически не изменяются при дальнейшем уменьшении площади ледового покрова. В работе показано, что на границе ледового покрова (паковый лед) с открытой водой (полыньями) турбулентный обмен усиливается. Его интенсивность зависит от температуры воды, воздуха и льда, а также толщины льда (более толстый лед способствует усилению турбулентности) и занимаемой им площади (максимум наблюдается, когда площадь льда немного превышает 50% общей площади морской акватории). В конце апреля–мае (осень) наблюдается период максимального льдообразования в Южном океане.

Наиболее обстоятельная работа, посвященная исследованию явных и скрытых потоков тепла в Антарктиде, выполнена группой авторов [Yu, Jin, Schulz, 2019]. Потоки тепла оценивались на основании четырех реанализов Южного океана и прямых измерений, полученных на борту ледокола Aurona Australis в периоды навигаций в 2010–2012 годах. Ледокол следовал по разрезу Хабарт (Тасмания – 42° ю.ш.) и восточной части Антарктического континента в широтном поясе Южного океана (42–58° ю.ш.) и области распространения кромки льда (58–68° ю.ш.). Измерения проводились для непокрытой льдом акватории Южного океана (42–58° ю.ш.) в период с октября по апрель. Последний месяц является осенним месяцем, после которого навигация в акватории восточной части Южного океана вблизи южного полярного круга закрывается, что не позволило авторам провести измерения в мае.

Проведенные измерения показали, что максимальные потоки скрытого тепла осенью Южного полушария обнаружены в области образования ледовой корки.

В работе [Yu, Jin, Schulz, 2019] представлены данные судовых изменений и реанализа протоков явного и скрытого тепла в области образования ледовой корки в восточной части Южного океана, омывающего Восточную Антарктиду (рисунок 6). Из рисунка 6 следует, что основной максимум притоков явного и скрытого тепла приходится на осень (апрель), а вторичный максимум отмечается весной (октябрь).

Величины коэффициентов линейных трендов температуры в разные месяцы года, свидетельствующие о скорости потепления климата в южной полярной шапке (70–90° ю.ш.) в Восточном (0–170° в.д.) и Западном (172,5° в.д. – 2,5° з.д.) полушариях, показаны на рисунке 4. Из рисунка 4 следует, что максимальный рост температуры в восточной части полярной шапки приходится на осенние и весенние месяцы. В эти же месяцы отмечаются максимальные притоки скрытого и явного тепла в атмосферу (рисунок 6). В высоких широтах Западного полушария обнаружен только один максимум скорости роста температуры в осеннее время года (март–май). Это свидетельствует о том, что имеется ряд различий в характере связей скорости роста температуры и притоков явного и скрытого тепла в различные месяцы года в Западном и Восточном полушариях. Такие различия могут быть связаны со следующими обстоятельствами. Материк Антарктида расположен асимметрично относительно Южного полюса. В Восточном полушарии материковость широтного пояса 65–90° ю.ш. близка к 90% от общей площади пояса, тогда как в Западном полушарии площадь материковой части и океанической акватории указанного широтного пояса близка к половине. Береговая черта моря Росса и моря Уэдделла в Западном полушарии достигает 80º-ых широт. Это свидетельствует о том, что область образования ледовой корки и, как следствие, выделения тепла при замерзании воды происходит непосредственно в полярной шапке (70–90° ю.ш.), тогда как в Восточном полушарии образование ледяной корки происходит на 10–15° южнее и посредством адвекции тепло поступает в

полярную шапку с некоторым запаздыванием. В ранних работах отмечалось, что потепление климата началось в Западной Антарктиде и только с определенным запаздыванием в Восточной части Антарктиды [IPCC. Climate…, 2013]. Результаты, полученные в данной работе, свидетельствуют, что потепление в полярной шапке Восточной Антарктиды развиваются в последние десятилетия (1990–2022 годы) быстрее, чем в Западной. Следует отметить, что данные фактических измерений скрытого и явного тепла, поступающего из океана в атмосферу в феврале–апреле, оказались существенно выше, чем по данным реанализов, а скорость роста температуры в высоких широтах Южного полушария в конце лета–осенью лучше согласуется с данными натурных измерений скрытого и явного тепла, чем с данными реанализов.

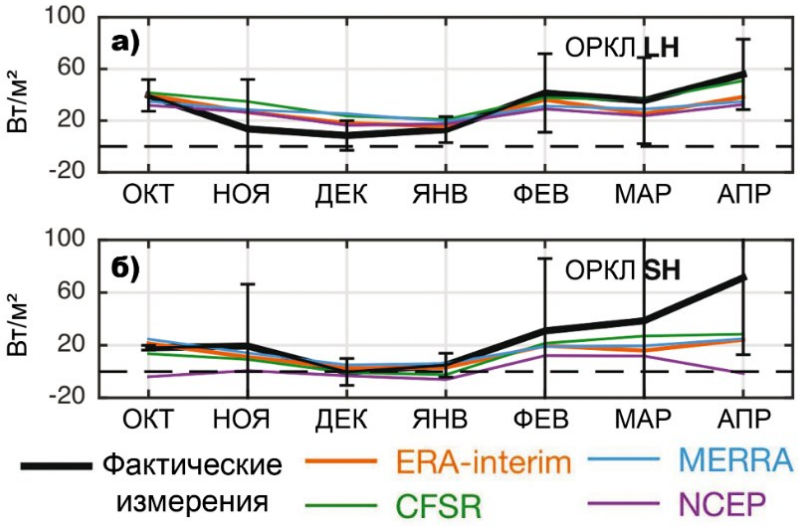


Рисунок 6. Потоки скрытого (а) и явного (б) тепла в области распространения кромки льда (ОРКЛ) в восточной части Южного океана по данным измерений на корабле погоды (черная линия) и систем реанализа (цветные линии, см. легенду).

Figure 6. Latent (a) and sensible (b) heat fluxes in the ice edge propagation region (ICER) in the eastern part of the Southern Ocean according to measurements on a weather ship (black line) and reanalysis systems (colored lines, see legend).

Принимая во внимание, что в Северном полушарии полярную шапку занимает Северный Ледовитый океан, а в Южном полушарии – материк Антарктида, характер пространственно-временных изменений температуры в полярных широтах Южного полушария (70–90° ю.ш.) будет несколько другим. Существенные различия в изменениях температуры в разные месяцы года должны наблюдаться в Антарктической полярной шапке Западного и Восточного полушарий, поскольку материк Антарктида в Восточном полушарии распространяется вплоть до 65° ю.ш., а в Западном полушарии до 7°° ю.ш. Это означает, что Южный океан внедряется в более высокие широты материка Антарктида в Западном полушарии и, как следствие, оказывает отепляющее влияние на климат южной полярной шапки. Выделение дополнительного скрытого тепла океана при ледообразовании будет осуществляться ближе к южной полярной шапке (70–90° ю.ш.), что, собственно, и обеспечивает большую скорость потепления в высоких широтах Западного полушария.

Второй, менее значительный максимум турбулентных притоков скрытого тепла приходится на середину весны Южного полушария (октябрь). Скорость роста температуры весной Южного полушария оказалась несколько выше, чем в теплое время года (ноябрь–февраль), но существенно уступает скорости потепления осенью (март–май) (рисунок 4б).

Проведенные нами исследования позволяют сделать вывод о смещении высоких

скоростей роста температуры в северной полярной шапке на вторую половину года (август–ноябрь), а в южной – на март–май (осень Южного полушария). В широтном поясе 30–65° с.ш. Северного полушария наибольшие скорости роста температуры за период современного потепления климата (1990–2022 годы) выявлены нами в сентябре–ноябре, а наименьшие скорости в январе–мае, то есть в первой половине года. Это свидетельствует о том, что эпоха зимнего потепления климата начинает сменяться эпохой летне-осеннего потепления климата [Логинов, Микуцкий, Бровка, 2023]. Модальные оценки притоков явного и скрытого тепла для крайнего сценария RCP 8.5, который может наступить с конца XXI столетия, свидетельствует об увеличении притоков явного и скрытого тепла в осенний период по сравнению с притоками тепла весной и зимой [Taylor et al., 2018], что указывает на формирование эпохи летне-осеннего потепления климата в высокоширотной зоне Северного полушария и возможно усиление скорости осеннего потепления климата в Южном полушарии.

Представленные результаты позволяют сделать вывод о важнейшей роли турбулентных потоков тепла и влаги между океаном и атмосферой и, как следствие, изменений циркуляции атмосферы в формировании разной скорости потепления в различные месяцы года. Собственно этим факторам и принадлежит большая роль в арктическом и антарктическом усилении потепления климата по сравнению с альбедной обратной связью.

Наибольшие неопределенности связаны с объяснением причин появления вторичного максимума коэффициента линейного тренда в высокоширотных регионах Арктики и Антарктики в весеннее время года. Как отмечалось ранее, имеется вторичный максимум в усилении скорости потепления климата в весеннее время года в ряде долготных зон полярной шапки Северного и Южного полушарий. Ниже приводятся некоторые первичные соображения о причинах формирования вторичного весеннего максимума в изменении скорости потепления климата в полярной шапке Северного и Южного полушарий.

В нашей работе [Логинов, Микуцкий, Бровка, 2023] показано, что максимальный приток солнечной радиации в весенний и осенний периоды наблюдается в приэкваториальной зоне. Он связан с изменением высоты Солнца в годовом ходе. Известно, что в результате в этой широтной зоне формируется два равноденственных максимума температуры. Если принять во внимание ключевую роль низких широт в формировании климата Земного шара, то можно полагать проявление изменений притока солнечной радиации в приэкваториальных широтах в изменении глобального климата. Однако, приток солнечной радиации на подстилающую поверхность приэкваториальных широт, как показано в работе [Логинов, Микуцкий, Бровка, 2023], больше в весеннее равноденствие, чем в осеннее. Это вступает в противоречие с полученными в этой работе результатами о большей выраженности осеннего равноденственного максимума в скорости потепления.

В работе Г.В. Алексеева [Алексеев, 1984] обращено внимание на максимальную и соизмеримую изменчивость притоков солнечной радиации в равноденственные месяцы, тогда как генерация кинетической энергии существенно больше весной по сравнению с осенью, что также не согласуется с большей скоростью потепления климата осенью по сравнению с весной.

В работах В.М. Федорова [Федоров, 2018] представлена иная точка зрения изменения притоков солнечной радиации в годовом ходе. В частности, им было показано, что форма Земли определяет больший приток солнечной радиации в периоды равноденствий и меньший в периоды солнцестояний.

В период зимнего солнцестояния приход солнечной радиации из-за эллиптичности орбиты Земли увеличивается, а в летние месяцы – уменьшается.

В работах В.М. Федорова также указывается, что в экваториальной области Северного и Южного полушарий температура слабо повышается; в то же самое время в полярных районах Северного полушария температура сильно увеличивается в результате

меридионального переноса радиационного тепла из низких широт. В полярных районах Южного полушария температура слабо повышается из-за блокировки меридионального переноса «ревущими сороковыми» и наличия мощного циркумполярного антарктического течения.

Градиент температуры «экватор–полюс», по мнению В.М. Федорова, в Северном полушарии уменьшается, а в Южном полушарии увеличивается.

Эта оригинальная точка зрения на природу глобальных изменений климата не является общепризнанной в научном сообществе, но ее также нельзя сбрасывать со счетов.

К внутренним факторам, претендующим на роль регулятора изменений скорости потепления климата в годовом ходе, можно отнести величину отношения изменений индекса зональной циркуляции ($I_з$) к меридиональной ($I_м$) по А.Л. Кацу (индекс I) [Кац, 1960].

В годовом ходе это отношение максимально осенью, а вторичный максимум отмечается во второй половине весны. Такой годовой характер изменения отношений $I_з/I_m$ определяется наибольшими значениями $I_м$ во второй половине весны и наименьшими – в начале осени (сентябрь).

Особенности изменения индекса I в годовом ходе, в общем, согласуются с изменением скорости потепления климата в годовом ходе, по крайней мере, в Сибирском, Дальневосточном и Тихоокеанском секторах (рисунок 3), где ледовитость морей (Лаптевых, Восточно-Сибирское, Чукотское и Баффина) в Северном Ледовитом океане наибольшая.

В постановочном плане можно также рассмотреть роль и других факторов в изменении скорости потепления климата: в ряде работ установлено наличие квазиполугодового колебания в изменении термодинамических характеристик океана. Обзор таких работ представлен, в том числе в нашем исследовании [Логинов, Микуцкий, Бровка, 2023].

Заключение

Скорость роста температуры в высоких широтах в период с 1990 до 2022 года испытывает значительные изменения в различные месяцы года. Среднее повышение температуры в полярной шапке (70–90° с.ш.) в период года, когда Северный Ледовитый океан покрыт льдом (октябрь–апрель), за указанный период времени составило 4,2°С. Положительная альбедная связь обеспечивает около одной трети указанного повышения температуры, а остальная часть повышения температуры в период с 1990 по 2022 год связана с ростом тепло- и влагообмена океана и атмосферы. Максимальный рост притока скрытого тепла приходится на октябрь, а вторичный максимум – на весну. Оценки воздухообмена между полярными широтами, сделанные Г.В. Алексеевым, показали, что максимум воздухообмена совпадает по времени с ростом тепло- и влагообмена океана и атмосферы в октябре [Алексеев, Харланенкова, Вязилова, 2023]. Теоретические и экспериментальные оценки притоков явного и скрытого турбулентного тепла в Северном Ледовитом океане и вблизи границы ледяной корки в Южном океане показали, что максимальные притоки явного и скрытого тепла в указанных районах Земного шара приходятся соответственно на октябрь в Северном Ледовитом океане и май (конец осени в Южном полушарии) в Южном океане. Для этих месяцев года, как показано в работе, характерны самые высокие скорости роста температуры в высоких широтах Северного и Южного полушарий, то есть самое большое по величине арктическое и антарктическое усиление потепления климата. Величина арктического усиления потепления в 1,4 раза больше, чем антарктическое усиление, что, вероятно, объясняется большей инерционностью климата южной полярной шапки и Южного полушария в целом.

Потепление климата в последние несколько десятилетий, как показано в многочисленных работах определяется радиационным форсингом парниковых газов, который к настоящему времени достиг 2,5 Вт/м^2 [IPCC. Climate…, 2013] и радиационным форсингом аэрозолей естественного (вулканического и биогенного) происхождения. К другим внешним факторам, оказывающим воздействие на климат, следует отнести изменение яркости солнечного диска (изменение солнечной постоянной) и изменение орбитальных параметров Земли. Роль последних

в изменении климата остается предметом острых дискуссий.

Выявлено смещение максимальных скоростей роста температуры в северной полярной шапке на август–ноябрь, а в южной – на март–май (осень Южного полушария). Установлено, что максимальная скорость роста температуры в широтном поясе 30–65° с.ш. сместилась в период современного потепления на осень (сентябрь–ноябрь), тогда как раньше наблюдалась в январе–апреле. Эти особенности в изменении современного изменения климата трудно объяснить, оставаясь в рамках парниковой теории климатических изменений.

Литература

Алексеев Г.В. Арктическое измерение глобального потепления // Лед и снег. 2014. № 2. С. 53–68.

Алексеев Г.В. Натурные исследования крупномасштабной изменчивости в океане. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 112 с.

Алексеев Г.В., Вязилова А.Е., Харланенкова Н.Е. Влияние низких широт на климатические условия на водосборах главных сибирских рек // Фундаментальная и прикладная климатология. 2020. Том 4. С. 54–67.

Алексеев Г.В. Динамическое усиление глобального потепления // Труды Международной конференции памяти академика А.М. Обухова. Москва: ГЕОС, 2014. С. 290–306.

Алексеев Г.В., Кузмина С.И., Уразгильдеева А.В., Бобылев Л.П. Влияние атмосферных переносов тепла и влаги на усиление потепления в Арктике в зимний период // Фундаментальная и прикладная климатология. 2016. Том 1. С. 43–63.

Алексеев Г.В., Харланенкова Н.Е., Вязилова А.Е. Арктическое усиление: роль междуширотного обмена в атмосфере // Фундаментальная и прикладная климатология. 2023. Том 9, № 1. С. 13–32. DOI: 10.21513/2410-8758-2023-1-13-32.

Васюта Ю.В., Мохов И.И., Петухов В.К. Чувствительность малопараметрических моделей климата к изменению характеристик меридионального переноса тепла // Изв. АН СССР. ФАО, 1988. Том 24, № 2. С. 115–125.

Виноградова В.В. Зимние волны холода на территории России со второй половины XX века // Известия РАН. Серия географическая. 2018. № 3. С. 37–46.

References

Alekseev G.V. Arkticheskoe izmerenie global'nogo potepleniya [The Arctic dimension of global warming]. *Led i sneg [Ice and snow],* 2014, no. 2, pp. 53–68. (In Russian; abstract in English).

Alekseev G.V. *Naturnye issledovaniya krupnomasshtabnoj izmenchivosti v okeane [In situ studies of large-scale variability in the ocean]*. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1984, 112 p. (In Russian; abstract in English).

Alekseev G.V., Vyazilova A.E., Harlanenkova N.E. Vliyanie nizkih shirot na klimaticheskie usloviya na vodosborah glavnyh sibirskih rek [Influence of low latitudes on climatic conditions at the catchments of the main Siberian rivers]. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya [Fundamental and Applied Climatology]*, 2020, vol. 4, pp. 54–67. (In Russian; abstract in English).

Alekseev G.V. Dinamicheskoe usilenie global'nogo potepleniya [Dynamic amplification of global warming]. *Trudy Mezhdunarodnoj konferencii pamyati akademika A.M. Obuhova [Proceedings of the International Conference in Memory of Academician A.M. Obukhov]*. Moscow, Publ. GEOS, 2014, pp. 290–306. (In Russian; abstract in English).

Alekseev G.V., Kuzmina S.I., Urazgil'deeva A.V., Bobylev L.P. Vliyanie atmosfernyh perenosov tepla i vlagi na usilenie potepleniya v Arktike v zimnij period [Influence of atmospheric transport of heat and moisture on the amplification of warming in the Arctic in winter]. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya [Fundamental and Applied Climatology]*, 2016, vol. 1, pp. 43–63. (In Russian; abstract in English).

Alekseev G.V., Kuzmina S., Bobylev L., Urazgildeeva A., Gnatiuk N. Impact of atmospheric heat and moisture transport on the Arctic warming.

Дымников В.П., Филатов А.Н. Устойчивость крупномасштабных атмосферных процессов. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. 236 с.

Кац А.Л. Сезонные изменения общей циркуляции атмосферы и долгосрочные прогнозы. Л.: Гидрометеоиздат, 1960. 270 с.

Логинов В.Ф. Радиационные факторы и доказательная база современных изменений климата. Минск: Беларус. навука, 2012. 266 с.

Логинов В.Ф. Диагноз глобального климата. СПб.: Лема, 2021. 304 с.

Логинов В.Ф., Бровка Ю.А. Периоды доминирования влияния естественных и антропогенных факторов на климат // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2022. Том 4. Вып. 4. С. 381–400. DOI: 10.34753/HS.2022.4.4.381.

Логинов В.Ф., Лысенко С.А. Современные изменения глобального и регионального климата. Минск: Беларуская навука, 2019. 315 с.

Логинов В.Ф., Микуцкий В.С., Бровка Ю.А. Изменения скорости современного потепления климата в различные месяцы года и их возможные причины // Гидрометеорология и образование. 2023. № 1. С. 6–42.

Мохов И.И. Диагностика структуры климатической системы. Л.: Гидрометеоиздат, 1993. 270 с.

Мохов И.И., Мохов О.И., Петухов В.К., Хайрулин Р.Р. Влияние глобальных климатических изменений на вихревую активность в атмосфере // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1992. Том 28, № 1. С. 11–26.

Семенов В.А., Латиф М. Роль колебаний площади арктического ледового покрова в формировании температурных аномалий в Арктике // Климат Арктики: процессы и изменения ; под ред. И.И. Мохова, В.А. Семенова. М.: Физматкнига, 2022. С. 115–121.

Семенов В.А., Мохов И.И., Латиф М. Роль границ морского льда и температуры поверхности океана в изменениях регионального климата в Евразии за

International Journal of Climatology, 2019, vol. 39, no. 8, pp. 3582–3592. DOI: 10.1002/joc.6040.

Alekseev G.V., Harlanenkova N.E., Vyazilova A.E. Arkticheskoe usilenie: rol' mezhdushirotnogo obmena v atmosphere [Arctic amplification: the role of interlatitudinal atmospheric exchange]. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya [Fundamental and Applied Climatology]*, 2023, vol. 9, no 1, pp. 13–32. DOI: 10.21513/2410-8758-2023-1-13-32.

Andry O., Bintanja R., Hazeleger W. Time-Dependent Variations in the Arctic's Surface Albedo Feedback and the Link to Seasonality in Sea Ice. *Journal of Climate*, 2016, vol. 30, pp. 393–410. DOI: 10.1175/jcli-d-15-0849.1.

Bekryaev R.V., Polyakov I.V., Alexeev V.A. Role of Polar Amplification in Long-Term Surface Air Temperature Variations and Modern Arctic Warming. *Journal of Climate*, 2010, vol. 23(14), pp. 3888–3906. DOI: 10.1175/2010JCLI3297.1.

Blackport R., Screen J.A. Insignificant effect of Arctic amplification on the amplitude of midlatitude atmospheric waves. *Science Advances*, 2020, vol. 6, no. 8. DOI: 10.1126/sciadv.aay2880.

Blackport R., Screen J.A., van der Wiel K., Bintanja R. Minimal influence of reduced Arctic sea ice on coincident cold winters in mid-latitudes. *Nature climate change*, 2019, vol. 9, pp. 697–704. DOI: 10.1038/s41558-019-0551-4.

Cao Y., Liang S., Che X., He T., Wang D., Cheng X. Enhanced wintertime greenhouse effect reinforcing Arctic amplification and initial sea-ice melting. *Scientific Reports*, 2017, vol. 7, 8462. DOI: 10.1038/s41598-017-08545-2.

Clark J.P., Shenoy V., Feldstein S.B., Lee S., Goss M. The role of horizontal temperature advection in arctic amplification. *Journal of Climate*, 2021, vol. 34(8), pp. 2957–2976. DOI: 10.1175/JCLI-D-19-0937.1.

Dai H. Roles of Surface Albedo, Surface Temperature and Carbon Dioxide in the Seasonal Variation of Arctic Amplification. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48, e2020GL090301. DOI: 10.1029/2020GL090301.

Davy R., Chen L., Hanna E. Arctic amplification metrics. *International Journal of Climatology*, 2018,

последние десятилетия // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Том 48, №4. С. 403–421.

Теоретические и экспериментальные основы стабилизации современного климата путем создания аэрозольных образований в нижней атмосфере / Ю.А. Израэль, И.И. Борзенкова, В.А. Гулевский, Б.Г. Данельян и др.; Институт глобального климата и экологии. М., 2019. 287 с.

Федоров В.М. Инсоляция Земли и современные изменения климата. М.: Физматлит, 2018. 232 с.

Alekseev G.V, Kuzmina S., Bobylev L., Urazgildeeva A., Gnatiuk N. Impact of atmospheric heat and moisture transport on the Arctic warming // International Journal of Climatology. 2019. Vol. 39, no. 8. Pp. 3582–3592. DOI: 10.1002/joc.6040.

Andry O., Bintanja R., Hazeleger W. Time-Dependent Variations in the Arctic's Surface Albedo Feedback and the Link to Seasonality in Sea Ice // Journal of Climate. 2016. Vol. 30. Pp. 393–410. DOI: 10.1175/jcli-d-15-0849.1.

Bekryaev R.V., Polyakov I.V., Alexeev V.A. Role of Polar Amplification in Long-Term Surface Air Temperature Variations and Modern Arctic Warming // Journal of Climate. 2010. Vol. 23(14). Pp. 3888–3906. DOI: 10.1175/ 2010JCLI3297.1.

Blackport R., Screen J.A. Insignificant effect of Arctic amplification on the amplitude of midlatitude atmospheric waves // Science Advances. 2020. Vol. 6, no. 8. DOI: 10.1126/sciadv.aay2880.

Blackport R., Screen J.A., van der Wiel K., Bintanja R. Minimal influence of reduced Arctic sea ice on coincident cold winters in mid-latitudes // Nature climate change. 2019. Vol. 9. Pp. 697–704. DOI: 10.1038/s41558-019-0551-4.

Cao Y., Liang S., Che X., He T., Wang D., Cheng X. Enhanced wintertime greenhouse effect reinforcing Arctic amplification and initial sea-ice melting // Scientific Reports. 2017. Vol. 7, 8462. DOI: 10.1038/s41598-017-08545-2.

Clark J.P., Shenoy V., Feldstein S.B., Lee S., Goss M. The role of horizontal temperature advection in arctic amplification // Journal of Climate. 2021. vol. 38, no. 12, pp. 4384–4394. DOI: 10.1002/joc.5675.

Dymnikov V.P., Filatov A.N. Ustojchivost' krupnomasshtabnyh atmosfernyh processov [Stability of large-scale atmospheric processes]. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1990, 236 p. (In Russian; abstract in English).

Fedorov V.M. Insolyaciya Zemli i sovremennye izmeneniya klimata [Earth's insolation and contemporary climate change]. Moscow, Publ. Fizmatlit, 2018, 232 p. (In Russian; abstract in English).

Goss M., Feldstein S.B., Lee S. Stationary Wave Interference and Its Relation to Tropical Convection and Arctic Warming. *Journal of Climate*. 2016, vol. 29, no. 4, pp. 1369–1389.

IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (Eds.) T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley. Cambridge, N.Y.: Cambridge University Press, 2013, 1535 p.

Izrael' Yu.A., Borzenkova I.I., Gulevskij V.A., Danel'yan B.G. et al. Teoreticheskie i eksperimental'nye osnovy stabilizacii sovremennogo klimata putem sozdaniya aerozol'nyh obrazovanij v nizhnej atmosfere [Theoretical and experimental bases of stabilisation of modern climate by creation of aerosol formations in the lower atmosphere]. Institut global'nogo klimata i ekologii [Institute for Global Climate and Ecology]. Moscow, 2019, 287 p.

Kashiwase H., Ohshima K. I., Nihashi S., Eicken H. Evidence for ice-ocean albedo feedback in the Arctic Ocean shifting to a seasonal ice zone. *Sci. Rep.*, 2017, 7(1), 8170. DOI: 10.1038/s41598-017-08467-z.

Katz A.L. Sezonnye izmeneniya obshchej cirkulyacii atmosfery i dolgosrochnye prognozy [Seasonal changes in the general circulation of the atmosphere and long-term forecasts]. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1960, 270 p.

Kulmala M., Lappalainen H.K., Zilitinkevich S. Pan-Eurasian Experiment (PEEX). *Science Plan*. Helsinki, 2005, 315 p.

Vol. 34(8). Pp. 2957–2976. DOI: 10.1175/JCLI-D-19-0937.1.

Dai H. Roles of Surface Albedo, Surface Temperature and Carbon Dioxide in the Seasonal Variation of Arctic Amplification // Geophysical Research Letters. 2021. 48. e2020GL090301. DOI: 10.1029/2020GL090301.

Davy R., Chen L., Hanna E. Arctic amplification metrics // International Journal of Climatology. 2018. Vol. 38, no. 12. Pp. 4384–4394. DOI: 10.1002/joc.5675.

Evidence for ice-ocean albedo feedback in the Arctic Ocean shifting to a seasonal ice zone / Kashiwase H., Ohshima K. I., Nihashi S., Eicken H. // Sci. Rep. 2017. 7(1). 8170. DOI: 10.1038/s41598-017-08467-z.

Goss M., Feldstein S.B., Lee S. Stationary Wave Interference and Its Relation to Tropical Convection and Arctic Warming // Journal of Climate. 2016. Vol. 29, no. 4. Pp. 1369–1389.

IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds. T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner,
M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley. Cambridge, N.Y.: Cambridge University Press, 2013. 1535 p.

Kulmala M., Lappalainen H.K., Zilitinkevich S. Pan-Eurasian Experiment (PEEX). Science Plan. Helsinki, 2005. 315 p.

Meleshko V.P., Johannessen O.M., Baidin A.V., Pavlova T.V., Govorkova V.A. Arctic amplification: does it impact the polar jet stream? // Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography. 2016. Vol. 68(1). Pp. 32330. DOI: 10.3402/tellusa.v68.32330.

Mid-summer snow-free albedo across the Arctic tundra was mostly stable or increased over the past two decades / E. Plekhanova, J.-S. Kim, J. Oehri, A. Erb, C. Schaaf, G. Schaepman-Strub // Environ. Res. 2022. Lett. 17. 124026. DOI: 10.1088/1748-9326/aca5a1.

Park H.S., Lee S., Son S.W., Feldstein S.B., Kosaka Y. The impact of poleward moisture and sensible heat

Loginov V.F. Diagnoz global'nogo klimata [Diagnosis of global climate]. Saint Petersburg, Publ. Lema, 2021, 304 p. (In Russian; abstract in English).

Loginov V.F. Radiacionnye faktory i dokazatel'naya baza sovremennyh izmenenij klimata [Radiation factors and the evidence base for contemporary climate change]. Minsk, Publ. Belaruskaya navuka, 2012, 266 p. (In Russian; abstract in English).

Loginov V.F., Brovka Yu.A. Periody dominirovaniya vliyaniya estestvennyh i antropogennyh faktorov na klimat [Periods of dominance of the influence of natural and anthropogenic factors on the climate]. *Hydrosphere. Gidrosfera. Opasnye processy i yavleniya [Hazardous processes and phenomena]*, 2022, vol. 4, issue 4, pp. 381–400. DOI: 10.34753/HS.2022.4.4.381.

Loginov V.F., Lysenko S.A. Sovremennye izmeneniya global'nogo i regional'nogo klimata [Changes in the rate of modern climate warming in different months of the year and their possible causes]. Minsk, Publ. Belaruskaya navuka, 2019, 315 p. (In Russian; abstract in English).

Loginov V.F., Mikuckij V.S., Brovka Yu.A. Izmeneniya skorosti sovremennogo potepleniya klimata v razlichnye mesyacy goda i ih vozmozhnye prichiny [Changes in the rate of modern climate warming in different months of the year and their possible causes]. *Gidrometeorologiya i obrazovanie [Hydrometeorology and Education]*, 2023, no. 1, pp. 6–42. (In Russian; abstract in English).

Meleshko V.P., Johannessen O.M., Baidin A.V., Pavlova T.V., Govorkova V.A. Arctic amplification: does it impact the polar jet stream? *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 2016, vol. 68(1), p. 32330. DOI: 10.3402/tellusa.v68.32330.

Mohov I.I. Diagnostika struktury klimaticheskoj sistemy [Diagnosis of the structure of the climate system]. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1993, 270 p. (In Russian; abstract in English)

Mohov I.I., Mohov O.I., Petuhov V.K., Hajrulin R.R. Vliyanie global'nyh klimaticheskih izmenenij na vihrevuyu aktivnost' v atmosfere [Influence of global climatic changes on vortex activity in the atmosphere]. *Izvestia RAN. Fizika atmosfery i okeana*

flux on arctic winter sea ice variability // Journal of Climate. 2015. Vol. 28, no. 13. Pp. 5030–5040.

Perlwitz J., Hoerling M., Dole R. Arctic tropospheric warming: causes and linkages to lower latitudes // Journal of Climate. 2015. Vol. 28. Pp. 2154–2167. DOI: 10.1175/JCLI-D-14-00095.1.

Petoukhov V., Semenov V.A. A link between reduced Barents-Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents, Journal of Geophysical Research // Atmospheres. 2010. Vol. 115, no. 21. DOI: 10.1029/2009JD013568.

Pithan F., Mauritsen T. Arctic amplification dominated by temperature feedbacks in contemporary climate models // Nature Geoscience. 2014. Vol. 7. Pp. 181–184. DOI: 10.1038/ngeo2071.

Serreze M.C., Francis J.A. The Arctic Amplification Debate // Climatic Change. 2006. Vol. 76. Pp. 241–264. DOI: 10.1007/s10584-005- 9017-y.

Serreze M., Barry R. Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis. Global and Planetary Change // Global planet change. 20011. Vol. 77. Pp. 85–96. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2011.03.004.

Smith D.M., Screen J.A., Deser C., Cohen J., Fyfe J.C., García-Serrano J., Jung T., Kattsov V., Matei D., Msadek R., Peings Y., Sigmond M., Ukita J., Yoon J.-H., Zhang X. The Polar Amplification Model Intercomparison Project (PAMIP) contribution to CMIP6: investigating the causes and consequences of polar amplification // Geoscientific Model Development. 2019. Vol. 12. Pp. 1139–1164. DOI: 10.5194/gmd-12-1139-2019.

Taylor P.C., Hegyi B.M., Boeke R.C. and Boisvert L.N. On the Increasing Importance of Air-Sea Exchanges in a Thawing Arctic: A Review // Atmosphere. 2018, 9, 41. DOI: 10.3390/atmos9020041.

Unraveling driving forces explaining significant reduction in satellite-inferred Arctic surface albedo since the 1980s / R. Zhang, H. Wang, Q. Fu, P.J. Rasch, X. Wang // PNAS. 2019. Vol. 116, no. 48. Pp. 23947–23953. DOI: 10.1073/pnas.1915258116.

Worby A.P. and Allison I. Ocean-atmosphere energy exchange over thin, variable concentration Antarctic

[Izvestia RAS. Atmosphere and Ocean Physics], 1992, vol. 28, no 1, pp. 11–26. (In Russian; abstract in English).

Park H.S., Lee S., Son S.W., Feldstein S.B., Kosaka Y. The impact of poleward moisture and sensible heat flux on arctic winter sea ice variability. *Journal of Climate*, 2015, vol. 28, no. 13, pp. 5030–5040.

Perlwitz J., Hoerling M., Dole R. Arctic tropospheric warming: causes and linkages to lower latitudes. *Journal of Climate*, 2015, vol. 28, pp. 2154–2167. DOI: 10.1175/JCLI-D-14-00095.1.

Petoukhov V., Semenov V.A. A link between reduced Barents-Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents. *Journal of Geophysical Research. Atmospheres*, 2010, vol. 115, no. 21. DOI: 10.1029/2009JD013568.

Pithan F., Mauritsen T. Arctic amplification dominated by temperature feedbacks in contemporary climate models. *Nature Geoscience*, 2014, vol. 7, pp. 181–184. DOI: 10.1038/ngeo2071.

Plekhanova E., Kim J.-S., Oehri J., Erb A., Schaaf C., Schaepman-Strub G. Mid-summer snow-free albedo across the Arctic tundra was mostly stable or increased over the past two decades. *Environ. Res.*, 2022, lett. 17. 124026. DOI: 10.1088/1748-9326/aca5a1.

Semenov V.A., Latif M. Rol' kolebanij ploshchadi arkticheskogo ledovogo pokrova v formirovanii temperaturnyh anomalij v Arktike [Role of Arctic ice cover area fluctuations in the formation of temperature anomalies in the Arctic]. *Klimat Arktiki: processy i izmeneniya [Arctic Climate: Processes and Changes]*. Ed. I.I. Mohov, V.A. Semenov. Moscow, Publ. Fizmatkniga, 2022, pp. 115–121. (In Russian; abstract in English).

Semenov V.A., Mohov I.I., Latif M. Rol' granic morskogo l'da i temperatury poverhnosti okeana v izmeneniyah regional'nogo klimata v Evrazii za poslednie desyatiletiya [The role of sea ice boundaries and ocean surface temperature in regional climate changes in Eurasia over the last decades]. *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana [Izvestia RAS. Atmosphere and Ocean Physics]*, 2012, vol. 48, no. 4, pp. 403–421. (In Russian; abstract in English)

pack ice // Annals of Glaciology. 1991. 15. Pp. 184–190. DOI: 10.3189/1991AoG15-1-184-190.

Yu L., Jin X. and Schulz E.W. Surface heat budget in the Southern Ocean from 42°S to the Antarctic marginal ice zone: four atmospheric reanalyses versus icebreaker Aurora Australis measurements // Polar Research. 2019. Vol. 38, 3349. Pp. 1–25. DOI: 10.33265/polar.v38.3349.

Zhang R., Wang H., Fu Q., Rasch P.J., Wu M., Maslowski W. Understanding the cold season Arctic surface warming trend in recent decades // Geophysical Research Letters. 2021. Vol. 48, GL094878. DOI: 10.1029/ 2021GL094878.

Serreze M., Barry R. Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis. Global and Planetary Change. *Global planet change*, 2011, vol. 77, pp. 85–96. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2011.03.004.

Serreze M.C., Francis J.A. The Arctic Amplification Debate. *Climatic Change*, 2006, vol. 76, pp. 241–264. DOI: 10.1007/s10584-005- 9017-y.

Smith D.M., Screen J.A., Deser C., Cohen J., Taylor P.C., Hegyi B.M., Boeke R.C. and Boisvert L.N. On the Increasing Importance of Ukita J., Yoon J.-H., Zhang X. The Polar Amplification Model Intercomparison Project (PAMIP) contribution to CMIP6: investigating the causes and consequences of polar amplification. *Geoscientific Model Development*, 2019, vol. 12, pp. 1139–1164. DOI: 10.5194/gmd-12-1139-2019, 2019.

Taylor P.C., Hegyi B.M., Boeke R.C. and Boisvert L.N. On the Increasing Importance of Air-Sea Exchanges in a Thawing Arctic: A Review. *Atmosphere*, 2018, 9, 41. DOI: 10.3390/atmos9020041.

Vasyuta Yu.V., Mohov I.I., Petuhov V.K. Chuvstvitel'nost' maloparametricheskih modelej klimata k izmeneniyu harakteristik meridional'nogo perenosa tepla [Sensitivity of low-parameter climate models to changes in the characteristics of meridional heat transport]. *Izvestiya AN SSSR [Izvestia of the USSR Academy of Sciences]*, 1988, vol. 24, no. 2, pp. 115–125. (In Russian; abstract in English)

Vinogradova V.V. Zimnie volny holoda na territorii Rossii so vtoroj poloviny HKH veka [Winter cold waves on the territory of Russia since the second half of the twentieth century]. *Izvestiya RAN, Seriya geograficheskaya [Izvestiya RAN. Geographical Series]*, 2018, no. 3, pp. 37–46. (In Russian; abstract in English).

Worby A.P. and Allison I. Ocean-atmosphere energy exchange over thin, variable concentration Antarctic pack ice. *Annals of Glaciology*, 1991, 15, pp. 184–190. DOI: 10.3189/1991AoG15-1-184-190.

Yu L., Jin X. and Schulz E.W. Surface heat budget in the Southern Ocean from 42°S to the Antarctic marginal ice zone: four atmospheric reanalyses versus icebreaker Aurora Australis measurements.

Polar Research, 2019, vol. 38, 3349, pp. 1–25. DOI: 10.33265/polar.v38.3349.

Zhang R., Wang H., Fu Q., Rasch P.J., Wang X. Unraveling driving forces explaining significant reduction in satellite-inferred Arctic surface albedo since the 1980s. *PNAS*, 2019, vol. 116, no. 48, pp. 23947–23953. DOI: 10.1073/pnas.1915258116.

Zhang R., Wang H., Fu Q., Rasch P.J., Wu M., Maslowski W. Understanding the cold season Arctic surface warming trend in recent decades. *Geophysical Research Letters*, 2021, vol. 48, GL094878. DOI: 10.1029/ 2021GL094878.

МЕТОДЫ, МОДЕЛИ И ТЕХНОЛОГИИ
METHODS, MODELS AND TECHNOLOGIES

УДК 556.16:504.064.2.001.18 DOI: 10.34753/HS.2023.5.1.59

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ МОНИТОРИНГ И МОДЕЛИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ СИНОПТИЧЕСКОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ СТОКА ВЗВЕШЕННЫХ НАНОСОВ МАЛОЙ ГОРОДСКОЙ РЕКИ

С. Р. Чалов[1,2], В. М. Морейдо[2], И. С. Денисова[1,2], И. А. Солоников[1]
[1]МГУ имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Москва, Россия
[2]Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

ira.denisova@icloud.com

Аннотация. В статье приводятся результаты высокочастотного мониторинга стока наносов крупнейшего правого притока р. Москвы в пределах города – р. Сетуни, осуществлявшегося в 2020–2021 гг. автоматическими регистраторами оптической мутности и уровня воды. Задействованы 2 ряда записи с 16 ноября 2019 г. по 19 марта 2020 г. (частота записи 10 минут) и с 1 марта 2021 г. по апрель 2021 г. и с июля 2021 г. по октябрь 2021 г. (частота записи 1 минута). В условиях высокой антропогенной нагрузки средняя мутность воды р. Сетунь достигает 100 мг/л, что в 3–4 раза выше фоновых значений. Отмечается корреляция мутности с расходами воды, которая возрастает при увеличении лага по времени от 0 до 50 часов. На основе совмещения измерений мутности воды с характеристиками уровня и расхода воды, атмосферных осадков и температуры воздуха, а также производных от них, проведена настройка 5 моделей машинного обучения для прогнозирования стока наносов с разрешением 1 час и 1 сутки. Наилучшие результаты продемонстрировала рекуррентная нейросеть LSTM RNN для прогноза суточных значений мутности воды: при среднеквадратической ошибке 10,8 NTU были

HIGH-FREQUENCY MONITORING AND MACHINE LEARNING MODELS FOR ASSESSING SYNOPTIC VARIABILITY OF SUSPENDED SEDIMENT FLOW OF A SMALL URBAN RIVER

Sergey R. Chalov[1,2], Vsevolod M. Moreido[2], Irina S. Denisova[1,2], Ivan A. Solonikov[1]
[1]Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russian Federation
[2]Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
ira.denisova@icloud.com

Abstract. The article presents the results of high-frequency monitoring of sediment flow of the largest right tributary of the Moscow River within the city – the Setun River, carried out in 2020–2021 by automatic recorders of optical turbidity and water level. Several recordings were involved from November 16, 2019 to March 19, 2020 (recording frequency 10 minutes) and from March 1, 2021 to April 2021 and from July 2021 to October 2021 (recording frequency 1 minute). Under conditions of high anthropogenic load, the average turbidity of the Setun River water reaches 100 mg/l, which is 3–4 times higher than background values. There is a correlation between turbidity and water flow rates, which increases with increasing time lag from 0 to 50 hours. Based on combining measurements of water turbidity with characteristics of water level and flow, precipitation, and air temperature, as well as derivatives from them, 5 machine learning models were configured to predict sediment runoff with a resolution of 1 hour and 1 day. The best results were demonstrated by the recurrent neural network LSTM RNN for forecasting daily values of water turbidity: with a root-mean-square error of 10.8 NTU, the time and magnitude of local

С. Р. Чалов, В. М. Морейдо, И. С. Денисова, И. А. Солоников. Высокочастотный мониторинг и модели машинного обучения для оценки синоптической изменчивости стока взвешенных наносов малой городской реки // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2023. Т. 5. Вып. 1. С. 59–74. DOI: 10.34753/HS.2023.5.1.59

верно определены время и величина локальных увеличений пика мутности.

Ключевые слова: городская гидрология; сток взвешенных наносов; мутность воды; модели машинного обучения.

increases in the turbidity peak were correctly determined.

Keywords: urban hydrology; suspended sediment flow; water turbidity; machine learning models.

Введение

Внутригодовое изменение водности рек обусловливает сезонную цикличность стока наносов. На малых реках, помимо режима выпадения осадков и водности, характеристики стока наносов в значительной степени определяются свойствами поверхности водосбора. Здесь существенное влияние оказывают физические характеристики почво-грунтов, режим их промерзания и увлажнения, состав и распространение растительности, режим залегания и стаивания снега на водосборе и т.п. На урбанизированных территориях в условиях сокращенного времени добегания дождевого стока исключительную выраженность приобретают суточные колебания, как правило, связанные с отдельными гидрологическими событиями (периодами повышения расходов воды в реке, вызванных погодными (синоптическими) факторами). В этих условиях характеристика режима стока наносов возможна исключительно на основе высокочастотных наблюдений, которые применительно к взвешенными наносам обеспечиваются автоматическими датчиками мутности. Подобные технологии позволяют получать принципиально новые данные о стоке наносов и, соответственно, применять к ним современные методы статистического анализа и математического моделирования. К последним относятся модели машинного обучения, которые в последние десятилетия стали активно внедряться в гидрологическую практику [Bhattacharya, Solomatine, 2006; Solomatine, Ostfeld, 2008; Moreido et al., 2021].

Применительно к стоку взвешенных наносов методы машинного обучения позволяли разработать прогнозные модели, основанные на учете метеорологических, гидрологических и геолого-геоморфологических факторов рек разного размера – от малых рек Пуэрто-Рико до р. Миссисипи [Sharafati et al., 2020; Zounemat-Kermani et al., 2020]. Ряд работ продемонстрировал перспективность применения методов машинного обучения для описания рядов стока наносов урбанизированных территорий [Behrouz, Yazdi, Sample, 2022]. По сравнению с известными эмпирическими моделями, описывающими сток наносов [Cohen, Kettner, Syvitski, 2014], методы машинного обучения значительно расширяют спектр учитываемых параметров и воспроизводимость мутности воды и расхода наносов. В России методы автоматизированного высокочастотного мониторинга и машинного обучения применялись только для изучения уровня воды. В литературе приводятся примеры успешного воспроизведения паводков октября 2018 г. на р. Мзымта и Пшиш Краснодарского края, где моделирование уровней воды с разной заблаговременностью (1–20 часов) было выполнено с использованием трёх моделей машинного обучения: ансамблевых моделей M5P и XGBoost на основе деревьев решений и нейросетевой модели MLP [Белякова и др., 2022]. Однако в целом внедрение подобных технологий в России до настоящего времени развития не получило в связи с недостатком рядов мониторинга.

Данная работа направлена на анализ результатов комплексного мониторинга стока воды и наносов, ведущегося на р. Сетунь в Москве с 2019 г. Здесь на основе автоматической регистрации уровней воды с помощью логгеров (самописцев) гидростатического уровня и оптической мутности воды собран уникальный ряд высокочастотных (частотой 1 измерение от 1 до 30 минут) значений уровня и мутности воды. На территории бассейна реки расположена метеорологическая обсерватория МГУ, проводящая полный комплекс наблюдений за осадками. В совокупности этот массив данных определил возможности комплексного

Chalov S.R., Vsevolod M. Moreido V.M., Denisova I.S., Solonikov I.A. High-frequency monitoring and machine learning models for assessing synoptic variability of suspended sediment flow of a small urban river. *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2023, vol. 5, iss. 1, pp. 59–74. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2023.5.1.59.

исследования реакции стока наносов урбанизированного бассейна на ход метеорологических и гидрологических факторов, что и являлось целью данной статьи. Задачами работы являлось статистическое описание режима мутности воды на основе высокочастотного мониторинга, адаптация нескольких алгоритмов машинного обучения для анализа стока взвешенных наносов и проведение тестовых оценок их применимости.

Материалы и методы

Бассейн р. Сетунь

Сетунь – крупнейший правый приток р. Москвы в её верхнем и среднем течении. Общая длина – 38 км, площадь водосбора – 190 км2. Водосбор примерно в равных частях разделен Московской кольцевой автомобильной дорогой (МКАД), пересекающей реку в 18 км от истока. Еще в 50-е гг. река полностью протекала по неурбанизированной территории и пересекала только Аминьевское и Староволынское шоссе и Киевскую железную дорог, однако в последнее десятилетие изменение границ природоохранных территорий значительно усилило массовое возведение капитальных строений и жилого фонда. В этих условиях активизировалась трансформация характеристик речного стока, в том числе стока наносов. Его основными факторами стало усиление сбросов сточных вод (в том числе со снегоплавильных станций в зимний период), 2–3 кратное увеличение времени добегания дождевого стока с водосбора [Chalov et al., 2023]. Значительная часть стока зарегулирована прудами, которые снижают максимальные значения расходов весеннего половодья и дождевых паводков, занимая на водосборе реки около одного процента территории [Черных, Сабитов, Алтунин, 2015].

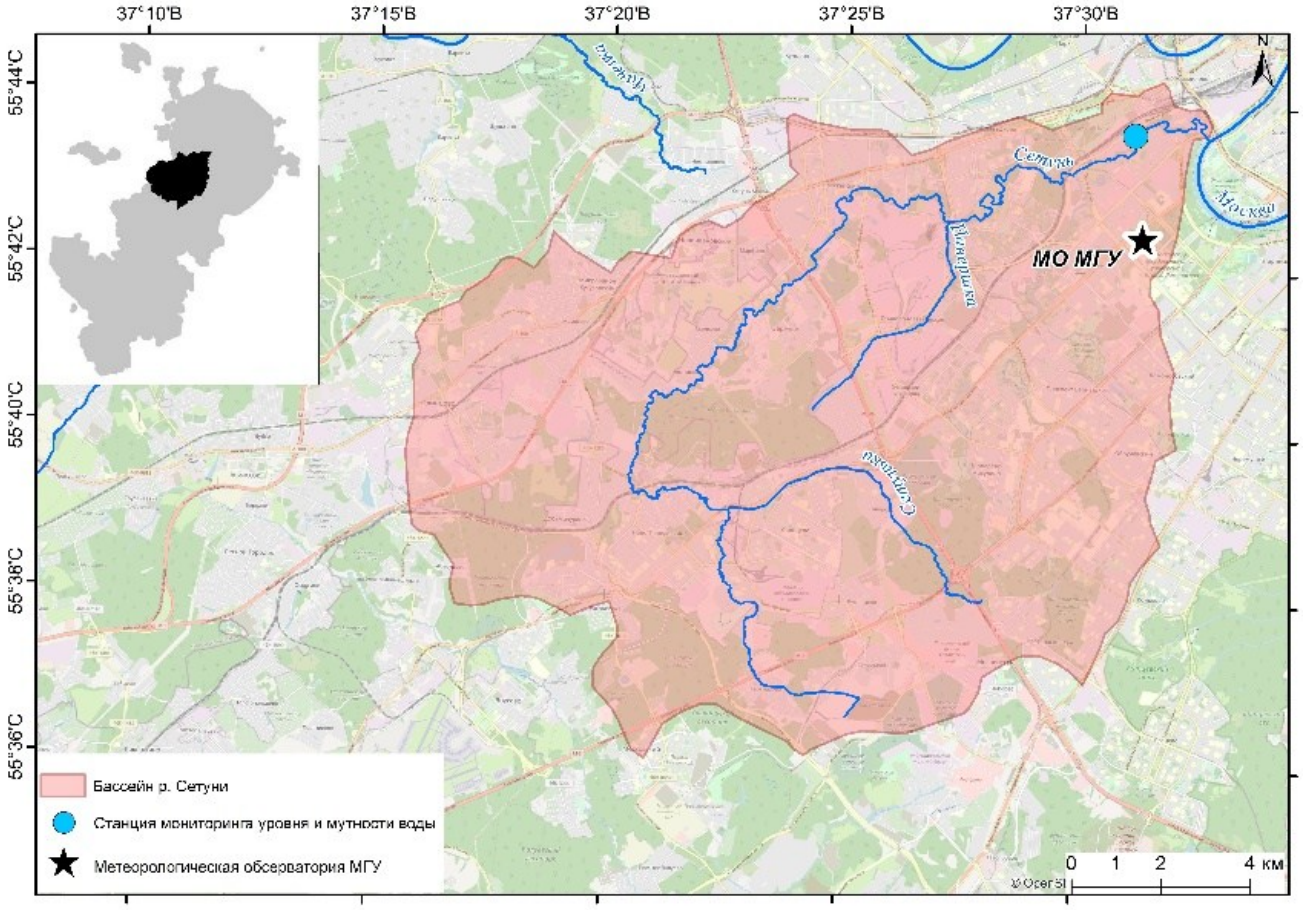


Рисунок 1. Станция мониторинга в бассейне р. Сетуни
Figure 1. Monitoring station in the Setun River basin

Мониторинговые данные

Данные, анализируемые в работе, получены по замыкающему створу, расположенному в нижнем течении р. Сетунь (рисунок 1). Здесь 14 ноября 2019 г. была организована станция мониторинга уровня и мутности воды, на которой с помощью барометрического логгера ведется запись значений уровня воды с интервалом 30 минут. Используется логгер HOBO Water Level (30 ft) Data Logger, который фиксирует суммарное гидростатическое давление атмосферы и толщи воды над гидростатическим датчиком давления прибора; запись ведется на внутренний накопитель. Барометрическая компенсация проводится по данным атмосферного давления метеостанции МГУ.

Для перехода от значений уровня к значениям расходов воды на данном створе наблюдений были организованы регулярные измерения расходов воды, которые позволили получить зависимости Q=f(H) в виде 1:

$$Q = \begin{cases} 8.935 \times H^2 - 4{,}056 \times H, \text{если } H < 1{,}07 \\ 15 \times H - 10{,}15, \text{если } H > 1{,}07 \end{cases} \quad (1)$$

где Q – расход воды (м3/с), H – уровень воды (м).

Уровни воды записывались автоматически с частотой 30 минут, таким образом полученный ряд расходов воды также имеет получасовое временное разрешение.

Данные о мутности воды записывались автоматическими логгерами, основанными на нефелометрическом принципе, (таблица 1) на протяжении двух периодов:

а) логгер Analite NEP-495, период с 16 ноября 2019 г. по 19 марта 2020 г., частота записи 10 минут (далее ряд 1);

б) логгер In-Situ Aqua Troll 600, период с 1 марта 2021 г. по апрель 2021 г. и с июля 2021 г. по октябрь 2021 г. частота записи 1 минута (далее ряд 2).

Нефелометрический метод измерения мутности речных вод основан на способности взвешенных частиц рассеивать световое излучение, проходящее через единицу объема воды: чем сильнее затухание светового потока с известными характеристиками, которое регистрирует один или несколько датчиков излучения, тем больше содержание в воде взвешенных частиц. Данный принцип используется большинством современных датчиков in situ. Приёмные датчики погружают в водный объект, их детекторы расположены под различными углами к источнику излучения, что позволяет определить степень рассеяния исходного пучка света. Регистрируемое на датчиках излучения изменение светового потока калибруется относительно стандартных растворов, что позволяет получить универсальное уравнение преобразования для достаточно широкого диапазона изменения мутности (от 0 до 4000 NTU [Droujko, Molnar, 2022]). Преимуществами такого метода являются: быстрое получение величины мутности, мобильность, возможность проведения непрерывного мониторинга мутности с высокой частотой измерений [Промахова, Чалов, 2015].

Таблица 1. Технические характеристики моделей регистраторов мутности.
Table 1. Technical characteristics of turbidity logger models.

Обозначение	Ряд 1	Ряд 2
Название модели	ANALITE NEP-495	In-Situ Aqua TROLL 600
Измеряемые параметры	Оптическая мутность, температура воды	Оптическая мутность, температура воды
Диапазон измеряемой мутности, NTU[1]	0 – 5000	0 – 4000
Погрешность определения	±1%	±2%
Частота записи использованная (возможная)	10 минут (1 сек – 18 ч)	1 минута (1 мин – 99 ч)
Период записи	16.11.2019 –19.03.2020	01.03.2021 – 29.10.2021

[1]NTU - нефелометрические единицы измерения оптической мутности потока (nephelometric turbidity units)

Подготовка данных производилась в среде RStudio при помощи средств языка программирования R. Первичное сглаживание данных производилось с помощью фильтра

Савитцки-Голея [Press, Teukolsky, 1990]. Затем из рядов были удалены бракованные участки записей, в которых значения мутности резко аномально повышались. Основная причина появления таких участков – заиление датчиков, при котором на чувствительных элементах прибора накапливались глинисто-илистые частицы, несмотря на проводившуюся периодическую очистку. Таким образом были получены основные характеристики высокочастотных рядов наблюдений, поделенные на отрезки с удаленными отбракованными участками (таблица 2).

Таблица 2. Основные характеристики высокочастотных рядов наблюдений.
Table 2. Main characteristics of high-frequency observation series.

Период	**2019–2020 часть 1**	**2019–2020 часть 2**	**2019–2020 полный**	**2021 часть 1**	**2021 часть 2**	**2021 полный**
Начало периода	05.12.19 9:00	31.12.19 7:00	05.12.19 9:00	09.03.21 11:45	22.07.21 14:41	01.03.21 10:00
Конец периода	24.12.19 19:00	29.01.20 6:50	29.01.20 6:50	03.05.21 22:30	28.10.21 7:53	28.10.21 7:53
Продолжительность, сут.	19 (каждые 10 минут)	29 (каждые 10 минут)	48 (каждые 10 минут)	51 (каждую 1 минуту)	93 (каждую 1 минуту)	144 (каждую 1 минуту)
Средняя мутность, NTU	54,09	26,37	37,49	80,99	31,61	47,19
СКО[2] мутности, NTU	14,15	14,83	19,92	108,28	60,24	81,81
Минимальная мутность, NTU	36,11	2,33	2,33	0,00	0,01	0,00
Максимальная мутность, NTU	90,37	81,03	90,37	1692,54	1359,99	1692,54
Средний расход воды, $м^3/с$	2,51	2,39	2,44	3,20	2,03	2,51
СКО расхода воды, $м^3/с$	0,32	0,30	0,31	1,77	1,30	1,93
Минимальный расход воды, $м^3/с$	2,07	2,05	2,05	1,44	0,93	0,93
Максимальный расход воды, $м^3/с$	5,10	4,62	5,10	11,74	16,82	30,76

[2]СКО - среднеквадратическое отклонение

Бракованные участки рядов характеризовались крайне высокой дисперсией значений, отчётливо выраженной на графиках хода мутности, что позволяло отличить бракованный участок с аномально высокой мутностью от пиков мутности, связанных с увеличением расходов воды (например, во время паводков).

Использованные в работе данные метеорологической обсерватории МГУ представляли собой срочные наблюдения за температурой воздуха и количеством осадков с января 2019 г. по февраль 2023 г. Температура воздуха измерялась термометром ТМ-4 («психрометром Августа») в метеорологической будке каждые 3 часа, количество осадков – осадкомером Третьякова О-1 при наличии осадков, 4 раза в сутки: в 6, 9, 18 и 21 час. Обработка данных о количестве осадков производилась в связи с характером данных следующим образом:

1) Значения в ряде данных для дней, когда осадки не наблюдались, были заполнены нулями;

2) Ряды данных были внутри каждых суток поделены на группы (для дней с осадками). Каждая группа включала снятое по осадкомеру значение суммы осадков за наблюдённый период и пустые строки выше вплоть до начала суток или до предыдущего измерения внутри данных суток;

3) Накопленные суммы осадков внутри каждой группы данных равномерно распределялись по этой группе. Так как ряд имеет

временное разрешение 3 часа, для каждой строки ряда было получено приближённое значение суммы осадков за 3 часа;

4) Полученные значения сумм осадков были поделены на 3, в результате были получены средние интенсивности осадков в мм/час.

Поскольку временно́е разрешение метеорологических данных значительно ниже разрешения данных о мутности и расходах воды, было принято решение привести данные о температуре воздуха и осадках к 1-часовой временной сетке. Также были подготовлены суточные ряды метеорологических данных, содержащие среднюю температуру и суточные суммы осадков.

Данные о мутности, расходах воды, температуре и осадках были собраны в единые наборы данных отдельно для двух рядов записей мутности (с логгеров Analite и In-Situ, соответственно). Так как данные о мутности и расходах воды имеют более высокое временно́е разрешение, значения температуры воздуха были линейно интерполированы для приведения к новой временно́й сетке. Значения интенсивностей осадков же, напротив, не могли быть линейно интерполированы в силу характера выпадения осадков, поэтому для каждой строки ряда данных была принята соответствующая ей среднечасовая величина интенсивности осадков. Ряд осадков, таким образом, получился ступенчатым, и для компенсации резких изменений значений он был сглажен скользящим средним с окном в 15 соседних значений.

Единичные пропуски данных наблюдений в рядах были заполнены с помощью линейной интерполяции. Значительные временны́е разрывы в рядах данных не могли быть каким-либо обоснованным образом заполнены, поэтому последующий анализ рядов проводился как для полных рядов, содержащих временные разрывы, так и для отдельных их частей, где такие разрывы отсутствовали. Для получения рядов с суточным разрешением величины мутности и расходов воды пересчитывались на новую временну́ю сетку, их значения осреднялись, после чего объединялись с суточными рядами метеоданных. Пример графика совмещённого хода мутности, расхода воды и осадков, построенного по объединённому суточному ряду, представлен на рисунке 2.

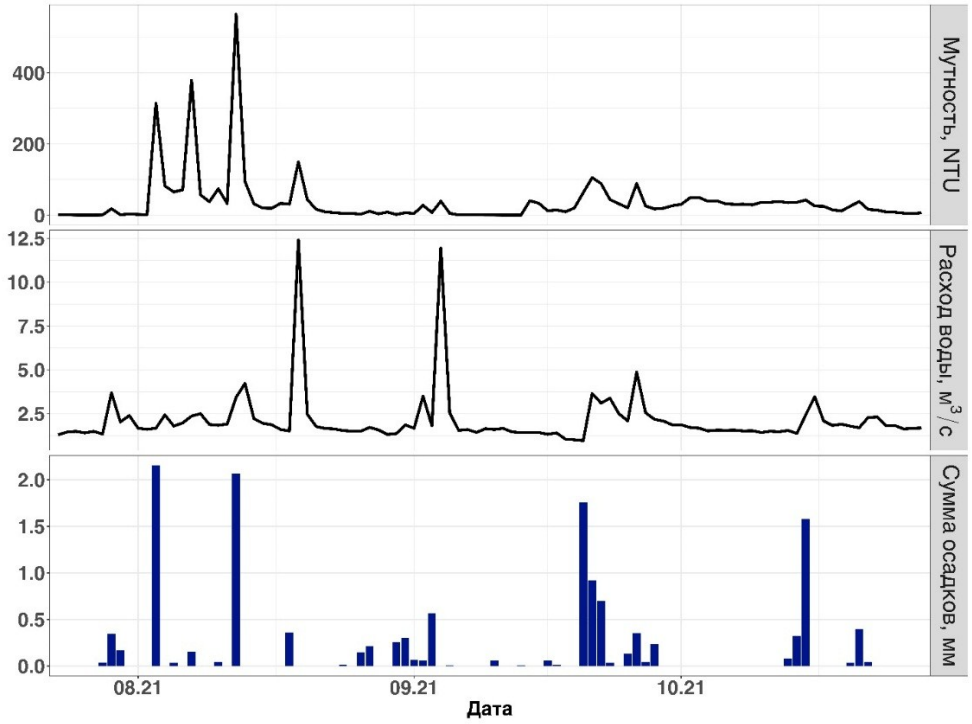


Рисунок 2. Ход мутности, расхода воды и осадков для р. Сетуни по суточным данным за лето–осень 2021 г.

Figure 2. Progress in turbidity, water flow and precipitation for the Setun River according to daily data for summer–autumn period, 2021.

Для общей характеристики стока наносов определялась средняя мутность по формуле 2:

$$\overline{x} = \frac{1}{n} \sum_i^n x_i \quad (2)$$

где $\overline{x}$ – среднее значение мутности, n – число измерений, x_i – i-е измерение мутности.

Стандартное отклонение определялось по формуле 3:

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_i^n (x_i - \overline{x})^2}{n-1}} \quad (3)$$

где $\bar{x}$ – среднее значение мутности, n – число измерений, x_i – i-е измерение мутности.

Разброс величины мутности был рассчитан как разность максимального и минимального значений всего ряда по формуле 4:

$$Sp_x = \max(x_i) - \min(x_i) \quad (4)$$

Коэффициент вариации мутности определялся по формуле 5:

$$c_v = \frac{S_x}{x} \times 100\% \quad (5)$$

Дополнительно по методике [Чалов, Цыпленков, 2020] рассчитывался индекс интенсивности турбулентных колебаний как среднее значение разности между соседними измерениями мутности воды по всему ряду наблюдений по формуле 6:

$$T2 - T1 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} (|x_{i+1} - x_i|) \quad (6)$$

где x_{i+1} и x_i – соседние измерения мутности.

Индекс *T2-T1/*Sp_x рассчитывался как отношение средней разности между соседними измерениями к разности максимального и минимального значения мутности по всему ряду наблюдений по формуле 7:

$$(T2 - T1)/Sp_x = \frac{T2 - T1}{\max(x_i) - \min(x_i)} \quad (7)$$

Данный индекс характеризует выраженность турбулентных колебаний мутности на фоне её общих флуктуаций и является мерой соотношения турбулентных и синоптических колебаний.

Описание использованных моделей

Для выявления закономерностей формирования стока взвешенных наносов и определения возможностей его количественного описания были использованы 5 моделей машинного обучения: ARIMA, Prophet, Random Forest Regressor, XGBRegressor, LSTM. Модель ARIMA [Box, Jenkins, 1970] является авторегрессионной моделью скользящего среднего для нестационарных временных рядов. Prophet [Taylor, Letham, 2018] – модель, реализованная в одноименной библиотеке, разработанной компанией Facebook, для прогнозирования временных рядов с открытым кодом на основе оптимизации аддитивных регрессионных моделей. Модель Random Forest Regressor [Pedregosa et al., 2011] из библиотеки Scikit-learn языка Python является ансамблевым алгоритмом на основе деревьев решений. Модель XGBRegressor [Chen, Guestrin, 2016] из библиотеки XGBoost языка Python также является ансамблевым алгоритмом на основе решающих деревьев, однако компенсация ошибок в процессе обучения модели в данном случае происходит не за счёт усреднения, а через обучение (модель градиентного бустинга). LSTM [Hochreiter, Schmidhuber, 1997; Kratzert et al., 2018] – модель, реализованная в библиотеке Keras, являющаяся разновидностью рекуррентных нейронных сетей и приспособленная к задачам прогнозирования временных рядов в случаях, когда важные события разделены временными лагами с неопределённой продолжительностью и границами.

Модели были использованы как для расчета ряда измеренных величин мутности, так и для прогнозирования её будущих значений на период до 3 недель. Для обучения и проверки моделей применялись данные о мутности воды с соответствующими предикторами за несколько периодов: с декабря 2019 г. по январь 2020 г., когда запись величин мутности велась логгером Analite; с марта 2021 г. по апрель 2021 г. и с июля 2021 г. по октябрь 2021 г., когда запись велась логгером

In-Situ; последний рассматривавшийся период представлял собой объединение обоих периодов наблюдений 2021 г. Поскольку ряды мутности и расходов имели различное временное разрешение (ряды мутности – 1 минута и 10 минут, ряды расходов – 30 минут), они были приведены к 1-часовому шагу путём осреднения. Таким образом, на основе исходных данных были созданы 2 типа рядов: с разрешением 1 час и с суточным разрешением (осредненные значения за 1 сутки).

В качестве предикторов модели использовались характеристики уровня и расхода воды, атмосферных осадков и температуры воздуха, а также их производных параметров (таблица 3). Список отобранных предикторов отличался между моделями, при этом основными предикторами выступали расход воды и суммы осадков за день и за неделю. Также в качестве предикторов обычно использовались температура воздуха и сдвинутые с определённым лагом (шагом во времени) величины расходов и сумм осадков. Измеренные температуры воздуха и воды имели высокую парную корреляцию, поэтому ради сокращения размерности данных и во избежание переобучения было принято решение объединить температуры воды и воздуха в один вектор-признак с помощью метода главных компонент (PCA).

Таблица 3. Перечень использованных для моделирования характеристик.
Table 3. List of the modelling dataset variables.

Обозначение	Характеристика
(1) NTU	мутность воды (в NTU);
(2) Q	расход воды (в $м^3/с$);
(3) RainIntensity	сглаженные значения интенсивности осадков (в мм/час);
(4) Hour	время суток (в часах);
(5) DayOfWeek	номер дня недели;
(6) DayOfYear	день года, нормализованный по шкале от 0 до 1;
(7) Month	номер месяца;
(8) QLag10	значение расхода воды, взятого с лагом в 10 наблюдений ($м^3/с$);
(9) QLag20	значение расхода воды, взятого с лагом в 20 наблюдений ($м^3/с$);
(10) QLag50	значение расхода воды, взятого с лагом в 50 наблюдений ($м^3/с$);
(11) QLag100	значение расхода воды, взятого с лагом в 100 наблюдений ($м^3/с$);
(12) RainIntensityLag10	сглаженные значения интенсивности осадков, взятые с лагом в 10 наблюдений (в мм/час);
(13) RainIntensityLag20	сглаженные значения интенсивности осадков, взятые с лагом в 20 наблюдений (в мм/час);
(14) RainIntensityLag50	сглаженные значения интенсивности осадков, взятые с лагом в 50 наблюдений (в мм/час);
(15) RainIntensityLag100	сглаженные значения интенсивности осадков, взятые с лагом в 100 наблюдений (в мм/час);
(16) AirTempSign	знак температуры воздуха;
(17) Temperature	объединённый показатель температуры воздуха и воды, полученный методом главных компонент (PCA);
(18) NTUdiff	разность между соседними измерениями мутности воды (в NTU);

Для подбора оптимальных параметров моделей использовались, при возможности, функции GridSearchCV и RandomizedSearchCV библиотеки Scikit-learn языка Python. Возможность количественной оценки мутности определялась как для её часовых значений, так и для суточных величин. Модели проверялись на способность оценивать мутность с использованием данных о её величинах за предшествующий период и без него. Метрикой эффективности модели служила среднеквадратическая ошибка (RMSE), вычисляемая по формуле 8:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(Y_i - \hat{Y}_i\right)^2} \quad (8)$$

где n – длина ряда наблюдений, Y_i – фактические значения показателя, $\hat{Y}_i$ – оценки значений показателя, i – номер наблюдения.

Результаты и обсуждение

Средняя мутность воды р. Сетунь в мониторинговом створе за период наблюдений изменяется от 37,49 до 47,19 NTU (таблица 4), что с учетом региональной формулы 9 пересчета оптической мутности воды в весовую [Sokolov et al., 2020], полученной по результатам одновременного определения обеих характеристик в пробах воды, соответствует значениям весовой мутности от 31,39 до 39,15 мг/л:

$$SSC = 1{,}4 + 0{,}8 \times T \quad (9)$$

где SSC – весовая мутность (мг/л), T – оптическая мутность (NTU).

Максимальная мутность воды достигала 73,7 и 1355,4 мг/л для Ряда 1 и Ряда 2 соответственно (таблица 4). Это по крайней мере в 3–4 раза выше фоновых значений мутности воды, характерных для малых рек верхней части Волжского бассейна [Караушев, 1977]. Полученные в ходе настоящей работы ряды мутности р. Сетунь свидетельствуют о наличии 20-минутных макротурбулентных изменений мутности воды. Потоку характерна максимальная интенсивность пульсаций мутности по сравнению с реками других природных условий [Чалов, Цыпленков, 2020], проявляющаяся в усилении вклада макротурбулентных изменений мутности в синоптические колебания. Отмечена высокая автокорреляция (cor≥0,75) значений мутности воды в пределах 100 минут. Существование изменений мутности воды в таком масштабе времени хорошо согласуется с когерентными структурами в речном потоке [Carling, Orr, 2000], которые связаны с неровностями руслового рельефа. Размеры вихрей столь низкой частоты охватывают всё сечение реки, в результате чего пульсирующим оказывается и сам расход воды. В условиях урбанизированного бассейна на нестационарный режим переноса взвесей оказывает роль и наличие случайных коротких сбросов из дренажно-коллекторной сети, фиксируемых по всему бассейну. Наличие этого фактора играет важную роль в обосновании дискретного режима измерений с использованием автоматических оптических датчиков.

Таблица 4. Средние характеристики рядов мутности воды р. Сетунь.
Table 4. Average characteristics of water turbidity datasets of the Setun River.

№	Сред. мутность, NTU	Макс. мутность, NTU	Мин. мутность, NTU	Станд. отклонение	Разброс	Коэф-т вариации *cv*, %	*T2-T1*, NTU	*T2-T1/Sp*$_x$, NTU
Ряд 1	37,49	90,37	2,33	19,92	88,04	0,53	0,4	0,00448
Ряд 2	47,19	1692,54	0,004	81,81	1692,54	1,73	0,48	0,00028

Анализ матриц парной корреляции (рисунок 3) свидетельствует о преимущественном воздействии на сток взвешенных наносов атмосферных осадков и водности реки ($cor \geq 0{,}5$). При этом с увеличением лага времени по осадкам (от нулевого лага до лага в 100 наблюдений, что соответствует 100 часам) скоррелированность между мутностью воды и интенсивностью осадков увеличивается, а при аналогичном увеличении лага расходов воды – уменьшается. В частности, корреляция ряда мутности с одновременным расходом воды составляет 0,5, с расходом воды, взятым с лагом 10 измерений (10 часов) – 0,48, а с лагом 100 измерений (100 часов) – 0,38. Корреляция с одновременными осадками составляет 0,53, с лагом 50 часов – 0,56, 100 часов – 0,58. Это, вероятно, связано с характерным для р. Сетуни временем склонового и руслового добегания – около 6–8 часов для осадков часовой интенсивности и около 36 часов для их накопленных сумм, что было показано в работе [Чалов и др., 2023].

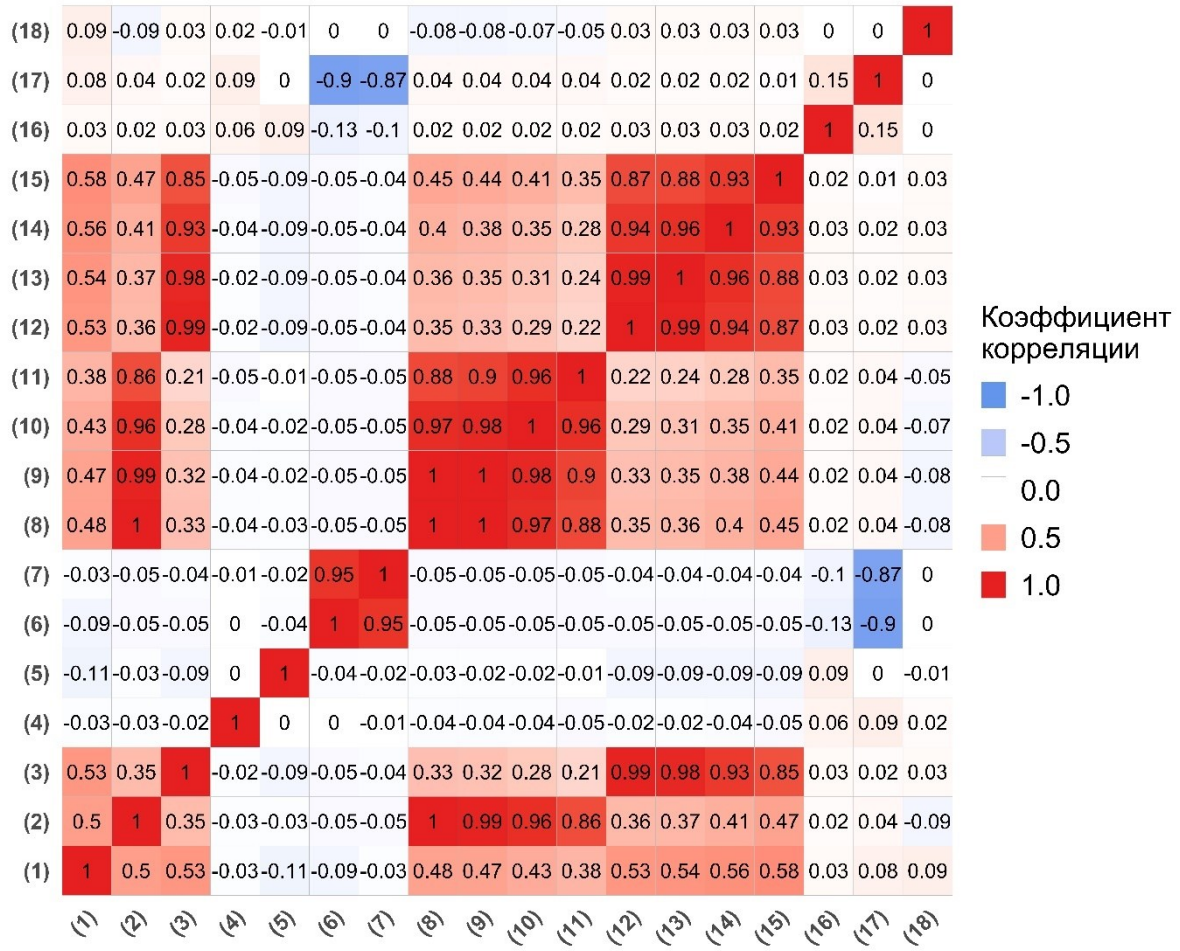


Рисунок 3. Корреляционная матрица предикторов по ряду 2 (обозначения в соответствии с табл. 3).
Figure 3. Correlation matrix of predictors for dataset 2 (see Table 3 for description).

Прогнозы по часовым рядам данных на моделях Prophet и ARIMA дали неудовлетворительные результаты. Так, например, прогноз по часовым данным на тестовой выборке моделью Prophet, обученной по данным за 2021 г., дал среднеквадратическую ошибку (RMSE) 46,3 NTU, а значение эффективности Нэша-Сатклиффа составило –11,7. Модель градиентного бустинга XGBRegressor показала лучшие результаты по часовым данным. Обученная только на данных о расходах воды, модель в общем сумела правильно определить пики мутности и тренды для недельного прогноза, однако среднеквадратическая ошибка прогноза (RMSE) составила 28,8 NTU.

Применение модели XGBRegressor для суточных величин по данным за вторую половину 2021 г. позволил спрогнозировать общий ход мутности воды на 4 недели вперёд. Один пик предсказанных значений мутности оказался сильно завышен, что дало вклад в величину среднеквадратической ошибки (RMSE), составившей 32,6 NTU. При использовании в XGBRegressor всех данных с 2019 по 2021 гг. при тестовой выборке 45 дней среднеквадратическая ошибка прогноза составила 37,2 NTU, однако при этом в целом верно был предсказан ход мутности и время наступления пиков (таблица 5).

Таблица 5. Рассмотренные методы количественной оценки мутности.
Table 5. Turbidity quantification methods reviewed.

Модель	Ряд наблюдений для обучения	Временное разрешение ряда	RMSE (в NTU)	Комментарий
Prophet	Полный ряд наблюдений 2021 г.	1час	46,3	Модель неверно оценила тренды, цикличность и пики. Верно оценено время наступления отдельных пиков.
ARIMA	Данные наблюдений за лето–осень 2021 г.	1 час	14,7	Несмотря на небольшую величину ошибки, модель неверно оценила тренды, цикличность и пики.
	Данные наблюдений за весну 2021 г.	1 час	24,2	Несмотря на небольшую величину ошибки, модель неверно оценила тренды, цикличность и пики.
XGBRegressor	Полный ряд наблюдений 2021 г.	1 час	28,8	Прогноз на 1 неделю. Правильно оценены общие тренды и время наступления пиков.
	Данные наблюдений за лето–осень 2021 г.	1 сутки	32,6	Прогноз на 4 недели. Правильно оценены общие треды, сильно завышен один из пиков.
	Все имеющиеся наблюдения	1 сутки	37,2	Прогноз на 45 дней. Правильно оценён общий ход мутности; сильно завышены пиковые значения.
RandomForestRegressor	Все имеющиеся наблюдения	1 сутки	27,5	Прогноз на 45 дней. Правильно оценён общий ход мутности, время наступления пиков, пиковые значения оказались завышены.
	Полный ряд наблюдений 2021 г.	1 сутки	29,5	Прогноз на 35 дней. Правильно оценён общий ход мутности, время наступления пиков, пиковые значения оказались завышены.
LSTM RNN	Полный ряд наблюдений 2021 г.	1 сутки	10,8	Прогноз на 3 недели. В первую неделю мутность была предсказана с высокой точностью, правильно смоделированы время наступления пика и его абсолютная величина. К концу периода прогноз разошёлся с данными наблюдений.
	Полный ряд наблюдений 2021 г.	1 час	14,4	Прогноз на 3 недели. Модель смогла правильно оценить общий ход мутности, время наступления пиков и их абсолютную величину. Также моделью была выявлена цикличность колебаний.

Более высокую эффективность при обучении на всех имеющихся данных за 2019–2021 гг. и прогнозе на 45 дней продемонстрировала модель RandomForestRegressor. Среднеквадратическая ошибка прогноза составила 27,5 NTU. Моделью был верно спрогнозирован общий ход мутности и время наступления пиков, которые по своей величине также оказались завышенными, но менее выраженно, чем при прогнозе моделью

XGBRegressor. При использовании в качестве обучающей выборки только данных 2021 г. прогноз на 35 дней среднеквадратическая ошибка прогноза составила 29,5 NTU. Общий тренд хода мутности был предсказан верно, однако значительное завышение пиковых величин мутности внесло вклад в большую величину погрешности. При этом моделью было правильно определено время наступления пиков.

Наиболее успешным является описание среднесуточных значений мутности при помощи нейросетевой модели LSTM. Среднеквадратическая ошибка составила 10,8 NTU. Величины мутности за первую неделю прогноза были предсказаны с высокой точностью, были верно определены время и величина локального пика мутности, однако далее расхождение фактических и прогнозных значений стало более явным (рисунок 4). Прогноз значения мутности на срок в 3 недели при использовании для обучения часовых наблюдений за мутностью, расходами, осадками и температурой по данным 2021 г. показали среднеквадратическую ошибку прогноза 14,4 NTU. Модель смогла предсказать общий ход мутности и время наступления пиков, однако несколько пиков моделью выявлены не были.

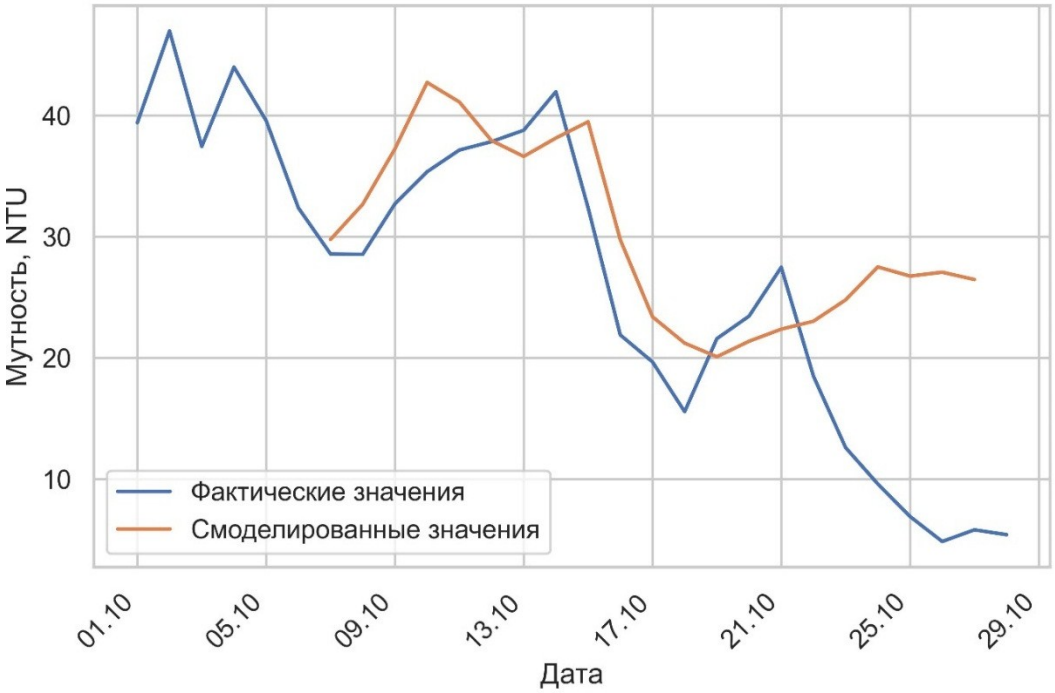


Рисунок 4. Фактические (синие) и смоделированные (оранжевый) величины оптической мутности воды (NTU) с помощью LSTM RNN по суточным данным в 2021 г.
Figure 4. Actual (blue) and simulated (orange) optical turbidity (NTU) values using LSTM RNN for daily data in 2021.

Выводы

На основе обработки данных высокочастотного автоматизированного мониторинга уровней и мутности воды дана оценка режима взвешенных наносов р. Сетунь. Выявлено увеличение значений мутности воды в 3–4 раза по сравнению с фоновыми величинами; сделан вывод о нестационарном режиме переноса взвесей; выявлена роль случайных коротких сбросов из дренажно-коллекторной сети, фиксируемых по всему бассейну. Отмечено наличие статистически достоверных корреляций мутности воды и интенсивности осадков и расходов воды, при этом корреляция с расходами снижается при увеличении лага по времени от 0 до 100 часов.

Дана оценка возможности прогнозирования величин мутности воды на р. Сетунь по данным об атмосферных осадках и расходах воды. Прогностические модели регрессии ARIMA и

Prophet дали неудовлетворительные результаты. Модели на основе деревьев решений XGBRegressor и RandomForestRegressor справились с задачей прогнозирования времени наступления пиков и общего тренда колебаний, однако среднеквадратическая ошибка прогнозов этих моделей зачастую сопоставима со среднеквадратическими отклонениями мутности за соответствующие периоды, что приводит к неудовлетворительным результатам. Рекуррентная нейросеть LSTM RNN, показавшая лучшие результаты с наименьшими погрешностями, является оптимальным из рассмотренных методов прогнозирования мутности воды.

Благодарности

Развитие мониторинговой сети и натурные исследования в бассейне р. Сетунь выполнено в рамках проекта РНФ 19-77-30004. Концепция исследования подготовлена в рамках программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы МГУ имени М.В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды».

Литература

Караушев А.В. Сток наносов, его изучение и географическое распределение. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. 240 с.

Прогнозирование уровней воды на реках Краснодарского края с использованием методов машинного обучения / *Белякова П.А., Морейдо В.М., Цыпленков А.С., Амербаев А.Н., Гречишникова Д.А., Курочкина Л.С., Филиппов В.А., Макеев М.С.* // Водные ресурсы. 2022. Т. 49. № 1. С. 13–26. https://doi.org/10.31857/S0321059622010047.

Реакция водного стока малой городской реки на экстремальные дождевые осадки на территории Москвы в 2020 и 2021 гг. / *Чалов С.Р., Платонов В.С., Морейдо В.М., Самохин М.А., Ярынич Ю.И., Коршунова Н.Н., Болгов М.В., Касимов Н.С.* // Метеорология и гидрология. 2023. Т. 2. С. 69–79. https://doi.org/10.52002/0130-2906-2023-2-69-79.

Промахова Е.В., Чалов С.Р. Современные технологии определения мутности воды // Маккавеевские чтения-2014. 2015. С. 82–95.

Чалов С.Р., Цыпленков А.С. Роль крупномасштабной турбулентности в изменении мутности речных вод // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2020. №. 3. С. 34–46.

Черных О.Н., Сабитов М.А., Алтунин В.И. Типизированные приемы экологического восстановления малых рек Москвы (на примере р.

References

Behrouz M.S., Yazdi M.N., Sample D.J. Using Random Forest, a machine learning approach to predict nitrogen, phosphorus, and sediment event mean concentrations in urban runoff. *Journal of Environmental Management*, 2022, vol. 317, pp. 115412. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115412.

Belyakova P.A., Moreido V.M., Tsyplenkov A.S., Amerbaev A.N., Grechishnikova D.A., Kurochkina L.S., Filippov V.A., Makeev M.S. Prognozirovanie urovnei vody na rekakh Krasnodarskogo kraya s ispol'zovaniem metodov mashinnogo obucheniya [Forecasting water levels on the rivers of the Krasnodar Territory using machine learning methods]. *Vodnye resursy [Water resources],* 2022, vol. 49, no. 1, pp. 13–26. https://doi.org/10.31857/S0321059622010047. (In Russian).

Bhattacharya B., Solomatine D.P. Machine learning in sedimentation modelling. *Neural Networks,* 2006, vol. 19, no. 2, pp. 208–214. https://doi.org/10.1016/j.neunet.2006.01.007.

Box G.E.P., Jenkins G.M. *Time Series Analysis: Forecasting and Control Holden-Day series in time series analysis and digital processing.* San Francisco, CA: Holden-Day, 1970, 575 p.

Carling P.A., Orr H.G. Morphology of riffle–pool sequences in the River Severn, England. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 2000, vol. 25, no. 4, pp. 369–384.

Сетунь) // Природообустройство. 2015. №. 3. С. 57–64.

Behrouz M.S., Yazdi M.N., Sample D.J. Using Random Forest, a machine learning approach to predict nitrogen, phosphorus, and sediment event mean concentrations in urban runoff // Journal of Environmental Management. 2022. V. 317. P. 115412. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115412.

Bhattacharya B., Solomatine D.P. Machine learning in sedimentation modelling // Neural Networks. 2006. V. 19. № 2. P. 208–214. https://doi.org/10.1016/j.neunet.2006.01.007.

Box G.E.P., Jenkins G.M. Time Series Analysis: Forecasting and Control Holden-Day series in time series analysis and digital processing. / San Francisco, CA: Holden-Day, 1970, 575 p.

Carling P.A., Orr H.G. Morphology of riffle–pool sequences in the River Severn, England // Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group. 2000. V. 25. № 4. P. 369–384. https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(200004)25:4<369::AID-ESP60>3.0.CO;2-M.

Chalov S.R., Platonov V.S., Moreido V.M., Samokhin M.A. Small Urban River Runoff Response to 2020 and 2021 Extreme Rainfalls on the Territory of Moscow // Russian meteorology and hydrology. 2023. V. 48. № 2. P. 138–146. https://doi.org/10.3103/S1068373923020061.

Chen T., Guestrin C. XGBoost: A Scalable Tree Boosting System // Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining : KDD '16. – New York, NY, USA: ACM, 2016. P. 785–794. https://doi.org/10.1145/2939672.2939785.

Cohen S., Kettner A.J., Syvitski J.P.M. Global suspended sediment and water discharge dynamics between 1960 and 2010: Continental trends and intra-basin sensitivity // Global and planetary change. 2014. V. 115. P. 44–58. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.01.011.

Droujko J., Molnar P. Open-source, low-cost, in-situ turbidity sensor for river network monitoring // https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(200004)25:4<369::AID-ESP60>3.0.CO;2-M.

Chalov S.R., Platonov V.S., Moreido V.M., Samokhin M.A. Small Urban River Runoff Response to 2020 and 2021 Extreme Rainfalls on the Territory of Moscow. *Russian meteorology and hydrology*, 2023, vol. 48, no. 2, pp. 138–146. https://doi.org/10.3103/S1068373923020061.

Chalov S.R., Platonov V.S., Moreido V.M., Samokhin M.A., Yarynich Yu.I., Korshunova N.N., Bolgov M.V., Kasimov N.S. Reaktsiya vodnogo stoka maloi gorodskoi reki na ekstremal'nye dozhdevye osadki na territorii Moskvy v 2020 i 2021 gg. [Reaction of water flow of a small urban river to extreme rainfall in Moscow in 2020 and 2021]. *Meteorologiya i gidrologiya [Meteorology and hydrology]*. 2023, vol. 2, pp. 69-79. https://doi.org/10.52002/0130-2906-2023-2-69-79. (In Russian)

Chalov S.R., Tsyplenkov A.S. Rol' krupnomasshtabnoi turbulentnosti v izmenenii mutnosti rechnykh vod [Influence of the macroturbulence on the dynamics of river water turbidity]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya,* 2020, no. 3, pp. 34–46. (In Russian; abstract in English).

Chen T., Guestrin C. XGBoost: A Scalable Tree Boosting System. *Proceedings of the twenty second ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining : KDD '16*, New York, NY, USA: ACM, 2016, pp. 785–794. https://doi.org/10.1145/2939672.2939785.

Chernykh O.N., Sabitov M.A., Altunin V.I. Tipizirovannye priemy ekologicheskogo vosstanovleniya malykh rek Moskvy (na primere r. Setun') [Typical methods of ecological restoration of small rivers of Moscow (using the example of the Setun River)]. *Prirodoobustroistvo,* 2015, no. 3, pp. 57–64. (In Russian; abstract in English).

Cohen S., Kettner A.J., Syvitski J.P.M. Global suspended sediment and water discharge dynamics between 1960 and 2010: Continental trends and intra-basin sensitivity. *Global and planetary change*, 2014, vol. 115, pp. 44–58. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.01.011.

Scientific Reports. 2022. V. 12. №1. P. 10341. https://doi.org/10.1038/s41598-022-14228-4.

Hochreiter S., Schmidhuber J. Long Short-Term Memory // Neural Computation. 1997. V. 9. № 8. P. 1735–1780. https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735.

Moreido V., Gartsman B., Solomatine D.P., Suchilina Z. How Well Can Machine Learning Models Perform without Hydrologists? Application of Rational Feature Selection to Improve Hydrological Forecasting // Water. 2021. V. 13. № 12. P. 1696. https://doi.org/10.3390/w13121696.

On the complexities of sediment load modeling using integrative machine learning: Application of the great river of Loíza in Puerto Rico / *Zounemat-Kermani M., Mahdavi-Meymand A., Alizamir M., Adarsh S., Yaseen Z.M.* // Journal of Hydrology. 2020. V. 585. P. 124759. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124759.

Press W.H., Teukolsky S.A. Savitzky-Golay Smoothing Filters // Computers in Physics. 1990. V. 4. № 6. P. 669–672. https://doi.org/10.1063/1.4822961.

Rainfall-runoff modelling using Long Short-Term Memory (LSTM) networks / *Kratzert F., Klotz D., Brenner C., Schulz K., Herrnegger M.* // Hydrology and Earth System Sciences. 2018. V. 22. № 11. P. 6005-6022. https://doi.org/10.5194/hess-22-6005-2018.

Scikit-learn: Machine Learning in Python. / *Pedregosa F. et al.* // the Journal of machine Learning research. 2011. V. 12. P. 2825–2830.

Sharafati A., Haji Seyed Asadollah S.B., Motta D., Yaseen Z.M. Application of newly developed ensemble machine learning models for daily suspended sediment load prediction and related uncertainty analysis // Hydrological Sciences Journal. 2020. V. 65. № 12. P. 2022–2042. https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1786571.

Sokolov D.I., Erina O.N., Tereshina M.A., Puklakov V. V. Impact Of Mozhaysk Dam On The Moscow River Sediment Transport // GEOGRAPHY, ENVIRONMENT, SUSTAINABILITY. 2020. V. 13. №. 4. P. 24–31. https://doi.org/10.24057/2071-9388-2019-150.

Droujko J., Molnar P. Open-source, low-cost, in-situ turbidity sensor for river network monitoring. *Scientific Reports*, 2022, vol. 12, no. 1, pp. 10341. https://doi.org/10.1038/s41598-022-14228-4.

Hochreiter S., Schmidhuber J. Long Short-Term Memory. *Neural Computation,* 1997, vol. 9, no. 8, pp. 1735–1780. https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735.

Karaushev A.V. *Stok nanosov, ego izuchenie i geograficheskoe raspredelenie [Sediment runoff, its study and geographical distribution]*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1977, 240 p. (In Russian)

Kratzert F., Klotz D., Brenner C., Schulz K., Herrnegger M. Rainfall-runoff modelling using Long Short-Term Memory (LSTM) networks. *Hydrology and Earth System Sciences,* 2018, vol. 22, no. 11, pp. 6005–6022. https://doi.org/10.5194/hess-22-6005-2018.

Moreido V., Gartsman B., Solomatine D.P., Suchilina Z. How Well Can Machine Learning Models Perform without Hydrologists? Application of Rational Feature Selection to Improve Hydrological Forecasting. *Water,* 2021, vol. 13, no. 12, pp. 1696. https://doi.org/10.3390/w13121696.

Pedregosa F. et al. Scikit-learn: Machine Learning in Python. *the Journal of machine Learning research,* 2011, vol. 12, pp. 2825–2830.

Press W.H., Teukolsky S.A. Savitzky-Golay Smoothing Filters. *Computers in Physics,* 1990, vol. 4, no. 6, pp. 669–672. https://doi.org/10.1063/1.4822961.

Promakhova E.V., Chalov S.R. Sovremennye tekhnologii opredeleniya mutnosti vody. *Makkaveevskie chteniya-2014*, 2015, pp. 82–95.

Sharafati A., Haji Seyed Asadollah S.B., Motta D., Yaseen Z.M. Application of newly developed ensemble machine learning models for daily suspended sediment load prediction and related uncertainty analysis. *Hydrological Sciences Journal*, 2020, vol. 65, no. 12, pp. 2022–2042. https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1786571.

Sokolov D.I., Erina O.N., Tereshina M.A., Puklakov V. V. Impact Of Mozhaysk Dam On The Moscow River Sediment Transport. *GEOGRAPHY, ENVIRONMENT, SUSTAINABILITY,* 2020, vol. 13,

Solomatine D.P., Ostfeld A. Data-driven modelling: some past experiences and new approaches // Journal of Hydroinformatics. 2008. V. 10. № 1. P. 3. https://doi.org/10.2166/hydro.2008.015.

Taylor S.J., Letham B. Forecasting at Scale // The American Statistician. 2018. V. 72. № 1. P. 37–45. https://doi.org/10.1080/00031305.2017.1380080.

no. 4, pp. 24–31. https://doi.org/10.24057/2071-9388-2019-150.

Solomatine D.P., Ostfeld A. Data-driven modelling: some past experiences and new approaches. *Journal of Hydroinformatics*, 2008, vol. 10, no. 1, p. 3. https://doi.org/10.2166/hydro.2008.015.

Taylor S.J., Letham B. Forecasting at Scale. *The American Statistician*, 2018, vol. 72, no. 1, pp. 37–45. https://doi.org/10.1080/00031305.2017.1380080.

Zounemat-Kermani M., Mahdavi-Meymand A., Alizamir M., Adarsh S., Yaseen Z.M. On the complexities of sediment load modeling using integrative machine learning: Application of the great river of Loíza in Puerto Rico. *Journal of Hydrology,* 2020, vol. 585, pp. 124759. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124759.

УДК 624.131.53

DOI: 10.34753/HS.2023.5.1.75

ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГРУНТА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ОБЪЕКТОВ ЛЕСНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

А.Ю. Виноградов[1,2], О.В. Зубова[2]

[1] ООО НПО «Гидротехпроект», г. Валдай, Россия; [2] ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», г. Санкт-Петербург, Россия

gd@npogtp.ru

Аннотация. Сопротивление грунта сдвигу – одна из ключевых характеристик грунта, влияющих на его несущую способность как при строительстве лесных дорог, так и при устройстве оснований водопропускных сооружений, производственных площадок и т.п. Погрешности в его определении приводят к существенному экономическому ущербу. Завышение экспериментально определяемых значений показателей сдвига ведет к проектным ошибкам, недолговечности оснований и разрушению сооружений, а занижение – к дополнительным расходам при проектировании и строительстве.

В статье рассматриваются вопросы обоснованности применения различных методик определения прочности грунта на сдвиг, точности измерений по данным методикам, интерпретации результатов. Проведен анализ определения показателей сцепления и угла внутреннего трения по методу консолидированно-дренированного среза и неконсолидированного (быстрого) среза. Сравнительные результаты лабораторного определения прочностных свойств разными методами (каждый из которых регламентирован действующими нормативными документами обязательного и добровольного применения) показывают, что сцепление одних и тех же образцов отличается в несколько раз, а также не всегда коррелирует с полевыми значениями. Кроме того, отмечено, что в лабораторных условиях практически невозможно добиться условий «ненарушенной» структуры грунта, т.е.

STRENGTH CHARACTERISTICS OF SOIL IN THE DESIGN OF FOREST INFRASTRUCTURE FACILITIES

Alexey Yu. Vinogradov[1,2], Oksana V. Zubova[2]

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

gd@npogtp.ru

Abstract. Soil shear resistance is one of the key characteristics of soil that affect its bearing capacity. Errors in its definition can lead to significant economic damage. Overestimation of experimentally determined values of shear indicators leads to the fragility of foundations and the destruction of structures, and underestimation leads to additional construction costs.

The article discusses the validity of the application of various methods used to determine the shear strength of soil, the accuracy of measurements obtained through these methods, and the interpretation of the results. The analysis focuses on the determination of the indicators of adhesion and the angle of internal friction using the method of consolidated-drained cut and unconsolidated (fast) cut is carried out. The comparative results of laboratory determination of strength properties using different methods (each regulated by GOST standards) show that the adhesion of the same samples differs several times, and also does not always correlate with field values. Additionaly, it is worth noting that replicating the "undisturbed" soil structure, which is akin to natural conditions (i.e. reproducibility of conditions of natural occurrence), is nearly impossible in laboratory settings., The difference in density and humidity of laboratory and field samples in sandy soils is especially significant. At the same time, the difference in the measured adhesion indicators for field and "prepared" samples was in some cases thousands of percent, the angle of internal friction was tens of percent. The article also reveals inconsistencies in the dimensional aspects of

Виноградов А.Ю., Зубова О.В. Прочностные характеристики грунта при проектировании объектов лесной инфраструктуры // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2023. Т. 5. Вып. 1. С. 75–86. DOI: 10.34753/HS.2023.5.1.75.

воспроизводимости условий естественного залегания. Особенно существенна разница плотности и влажности лабораторных и полевых проб у песчаных грунтов. При этом отличие в измеренных показателях сцепления у полевых и «подготовленных» образцов составляло в отдельных случаях тысячи процентов, угла внутреннего трения – десятки процентов. Также в статье отражены выявленные несоответствия в размерности применяемого для определения касательного напряжения уравнения Кулона, показаны ошибки определения сдвиговых характеристик, возникающие из-за несоответствия размеров образца (высоты и диаметра) природным условиям. Проанализированы недостатки полевых испытаний грунтов на сдвиг по стандартным методикам.

Ключевые слова: консолидированно-дренированный срез; неконсолидированный (быстрый) срез; угол внутреннего трения грунта; сцепление грунта; пористость грунта; закон Кулона для грунтов.

the Coulomb equation used to determine the tangential stress, and shows errors in determining shear characteristics that arise due to the discrepancy between the sample dimensions (height and diameter) and natural conditions. The drawbacks of counducting field tests of soils for shear according to standard methods are analyzed.

Keywords: consolidated-drained cut; unconsolidated (fast) cut; angle of internal friction of the soil; soil adhesion; porosity of the soil; Coulomb's law for soils.

Введение

Разрушение грунта происходит при преодолении тангенциальным (сдвигающим) напряжением предела прочности на срез, обусловленного внутренним сопротивлением. Поэтому характеристиками грунта, определяющими его несущую способность, являются прочностные характеристики.

К прочностным характеристикам грунта, согласно общепринятому подходу, относятся сцепление c и угол внутреннего трения φ. Сцепление c, численно равно касательным напряжениям τ, которые нужно приложить к грунту, чтобы разрушились внутренние связи (***при нулевом нормальном напряжении***) [Петраков А.А., Яркин В.В. и др., 2004]. Угол внутреннего трения φ учитывает затраты внешней силы на внутреннее сопротивление начальному перемещению частиц грунта и последующее их взаимное трение.

Сцепление грунта характеризует сопротивление структурных связей срезу связываемых ими частиц. Величина удельного сцепления определяется как отрезок, отсекаемый прямой зависимости сопротивления грунта срезу от вертикального давления на оси ординат при нулевом вертикальном давлении [Крамаренко В.В., 2011].

Угол внутреннего трения грунта характеризует сопротивление взаимному перемещению частиц грунта. Определяется как тангенс угла наклона прямой зависимости сопротивления грунта срезу от вертикального давления к оси абсцисс [Крамаренко В.В., 2011].

Сцепление и угол внутреннего трения увязаны между собой законом Кулона в тангенциальное напряжение: $\tau_{\text{сопр}} = \sigma tg\varphi + \text{c}$ [Цытович Н.А., 1963]. С физической точки зрения [Виноградов Ю.Б., 1982] данное напряжение является напряжением, удерживающим грунтовое тело от среза. Чем выше значения сцепления и угла внутреннего трения, тем более устойчивым является грунт.

Исходя из приведенных определений ясно, что прочностные свойства грунта определяют стабильность его состояния и способность

Vinogradov A. Yu., Zubova O.V. Strength characteristics of soil in the design of forest infrastructure facilities. *Hydrospaere. Hazard processes and phenomen,* 2023, vol. 5. iss. 1. C. 75–86. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2023.5.1.75.

противостоять внешним воздействиям и нагрузкам.

Однако, такой подход, к сожалению, неоднозначен, методики оценки прочностных свойств вызывают обоснованные вопросы, полученные в результате полевых и лабораторных работ значения, не выдерживают критики и зависят от той или иной интерпретации.

Постановка задачи

В данной статье, первой из цикла о прочностных характеристиках грунтов, поднимаются и рассматриваются вопросы объективности, точности измерений прочностных характеристик, обоснованности методик и т.п.

Большинством грунтоведов в настоящее время прочностные характеристики грунта воспринимаются как значащие обоснованные параметры, характеризующие физические свойства грунта.

Точность определения

Общая относительная погрешность лабораторного определения значения сцепления при одноплоскостном срезе в диапазоне от 0,005 до 0,08 МПа меняется от 95 до 34% (от 0,0048 до 0,027 МПа) [Дмитриев В.В., Ярг Л.А., 2008]. При с=0,08 МПа относительная составляющая случайной погрешности 22%, систематической – 25%. Точность лабораторной оценки прочностных свойств песчаных и глинистых грунтов приведена в таблице 1.

Таблица 1. Точность лабораторной оценки прочностных свойств песчаных и глинистых грунтов [Дмитриев В.В., Ярг Л.А., 2008].

Table 1. Accuracy of laboratory assessment of strength properties of sandy and clay soils.

Вид грунта	**Среднее сцепление с, МПа**	**Погрешность определения с, МПа/%**		
		внутрилабораторная	**межлабораторная**	**лабораторная**
Песок	0,008	0,005/57	0,004/47	0,006/80
	0,018			
	0,052			
	0,370			
Супесь	0,018	0,006/36	0,006/33	0,008/47
Суглинок	0,052	0,013/25	0,014/26	0,019/37
Глина	0,037	0,01/27	0,01/28	0,014/38
Вид грунта	**Средняя величина угла внутреннего трения, град**	**Погрешность определения φ, град/%**		
Песок	30,4	2,0/6	2,7/9	3,4/11
Супесь	29,3	2,0/7	2,8/9	3,4/12
Суглинок	16,5	2,6/16	3,4/21	4,3/26
Глина	16,7	2,6/16	3,4/20	4,3/26

В числителе абсолютная погрешность, в знаменателе – относительная (с. 363, с. 374) [Дмитриев В.В., Ярг Л.А., 2008]

Выполненные нами, в соответствии с требованиями ГОСТ 12248.1-2020. Грунты. Определение характеристик прочности методом одноплоскостного среза[1], ГОСТ 12248.2-2020. Грунты. Определение характеристик прочности методом одноосного сжатия[2], ГОСТ 12248.3-2020. Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости методом трехосного сжатия[3] расчет угла внутреннего трения и сцепления по протоколам лабораторных испытаний в сравнении с обобщенными результатами трехосных консолидировано-дренированных испытаний грунтов, сделанными на основании тех же протоколов, представлен в таблице 2. Расчет проведен согласно раздел 9 «Обработка результатов» ГОСТ 12248.3–2020,

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

[2] ГОСТ 12248.2–2020. Грунты. Определение характеристик прочности методом одноосного сжатия

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

Раздел 7 Вычисление нормативных и расчетных значений угла внутреннего трения и удельного сцепления грунтов. ГОСТ 20522–2012 Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний[4]. Средние сдвиговые показатели сцепления для песков экстраполированы согласно таблице А.1. СП 22. 13330–2016 «Основания зданий и сооружений». Актуализированная редакция СНиП 2.02.01–83[5].

Таблица 2. Расчет угла внутреннего трения и сцепления по протоколам лабораторных испытаний.
Table 2. Calculation of the angle of internal friction and adhesion according to laboratory test protocols.

Инженерно-геологический элемент (ИГЭ)	Скв.	Глубина взятия пробы h, м	Бытовое давление σv, МПа	Сцепление, с		Погрешность определения с, МПа/%	Угол внутреннего трения, φ		Погрешность определения φ, град/%
				Наш расчет	Принято в табл.		Наш расчет	Принято в табл.	
17	14	11,2	0,18	0,0028	0,003	0,0002/7	45,8	42	3,8/9
	14	10,8	0,2						
	14	11,9	0,24						
	14	11,5	0,175						
	14	13,5	0,25						
15	14	8,5	0,16	0,010	0,011	0,001/9	38,9	33	5,9/18
	14	9	0,18						
	14	9,5	0,2						
	14	9,9	0,21						
	14	10,0	0,22						
	14	10,4	0,24						
16	1	15,7	0,15	0,0057	0,006	0,0003/5	41,2	36	5,2/14
	2	12	0,12						
	2	13,5	0,13						
	2	15,7	0,19						
	3	12,9	0,24						
	6	9	0,16						
	6	8,9	0,1						
20	6	17,4	0,278	0,027	0,045	0,018/40	30,4	19	11,4/60
	14	15,5	0,3						
14	3	17,2	0,2	0,024	0,044	0,02/44	38,9	31	7,9/25
	3	17,6	0,3						
	7	19,9	0,34						
23а	3	17,2	0,2	0,071	0,083	0,012/14	35,0	28	7/25
	3	17,6	0,3						
	7	19,9	0,34						
23б	12	38,8	0,63	0,389	0,175	0,214/122	26,1	28	1,9/7
	12	39,7	0,54						
	12	40,8	0,56						
23в	4	43,4	0,585	0,039	0,049	0,01/20	26,2	14	12,2/14
	12	43,1	0,7						
	12	43,9	0,8						

[4] ГОСТ 20522–2012 Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний

[5] СП 22. 13330–2016 «Основания зданий и сооружений». Актуализированная редакция СНиП 2.02.01–83

Продолжение таблицы 2

11	15	9,4	0,18	0,107	0,048	0,059/ 123	18,9	19	0,1/1
	16	9,9	0,19						
21	15	17,6	0,4	0,320	0,041	0,279/ 680	16,8	25	8,2/32
	16	20,4	0,5						
	13	9,5	0,8						
	13	9,9	0,9						
18	11	9,0	0,7	0,002	-	-	48	43	5/12
	11	9,3	0,8						

Относительная погрешность в определении сцепления в ряде случаев превышает 100 % (инженерно-геологический элемент (ИГЭ) 23б – супесь и 11 – глина) и для ИГЭ-21 (супесь) достигает 680 %. Несколько лучше ситуация с оценкой угла внутреннего трения (ИГЭ-14, 23а – супесь) погрешность составляет 25%, ИГЭ-21 (супесь) – 32% и ИГЭ-20 (глина) – 60%. Причина таких расхождений проста: при получении «неправильных» расчетных значений сцепления и угла внутреннего трения, производится заимствование из таблиц А.1. – А.2., приведенных в СП 22. 13330-2016. Причем, подобный подход всегда имеет место на практике, но ***нигде*** не регламентирован. Этот факт удручает и ставит под сомнение саму необходимость таких дорогостоящих исследований, как трехосные консолидировано-дренированные испытания.

С другой стороны, при трехосных испытаниях могут оцениваться прочностные характеристики «подготовленных» песчаных грунтов, поскольку методика одноплоскостного среза (ГОСТ 12248.1.), по непонятным причинам, такой возможности не предоставляет в принципе.

Нами лабораторные эксперименты на неконсолидированный быстрый одноплоскостной срез с несвязными грунтами проводились массово, полученные значения вполне вписываются в общепринятые рамки и не требуют вышеприведенных приемов.

Пробоподготовка

Как указано в п. 4.4 ГОСТ 30416-2020[6]: «Испытания проводят на образцах грунта ненарушенного сложения с естественной влажностью и в водонасыщенном состоянии или на искусственно приготовленных пробах и образцах с заданными плотностью и влажностью, значения которых устанавливают в программе испытаний».

Однако даже связные грунты, отобранные в виде монолитов, не имеют, строго говоря, ненарушенной структуры. Известно, что извлечение образца грунта из скважины или шурфа сопровождается уменьшением напряжений в скелете образца грунта и снижением до нуля давления в поровой воде [Пыхтеева Н.Ф., Букша, В.В. и др., 2018]. Попыток пересчета прочностных характеристик, полученных в лабораторных (или полевых) условиях в истинные значения, которые бы проводились с учетом этих изменений, в литературе нами не обнаружено. Оценка погрешности измерения прочностных характеристик на искусственно подготовленных пробах по сравнению с монолитами также отсутствует.

По меньшей мере, песчаные грунты ***практически*** не исследуются на прочностные свойства в естественном залегании. Если нам необходимо посчитать несущую способность песчаных грунтов, залегающих под фундаментом проектируемого нами здания, то мы априори этого сделать не можем. Например, природное сцепление песчаника, слежавшегося где-нибудь в Ленинградской области под историческим воздействием ледниковых масс, может составлять сотни КПа, что категорически не соответствует общепринятым оценкам.

Измеренное значение сцепления слежавшегося мелкозернистого песчаника,

[6] ГОСТ 30416–2020 Грунты. Лабораторные испытания. Общие положения

исследованного на прочностные свойства в разрезе на берегу р. Порусья Поддорского района Новгородской области с глубины залегания 6—7 м плотностью 2,30 г/см^3, коэффициенте пористости 0,15, составило 1,56 МПа. «Подготовленные» пробы с того же горизонта при трехосных испытаниях показали значения с=0,011 МПа при угле внутреннего трения φ= 36° (таблица 4). Надо иметь в виду, что нам не удалось воссоздать искусственно первоначальную плотность рассматриваемого грунта.

К сожалению, литературных источников с результатами измерений прочностных свойств песчаных грунтов непосредственно в полевых условиях крайне мало [Литвинов И.М., 1951]. Одно из немногих литературных свидетельств самой возможности существования настолько значительных величин сцепления для песчаных грунтов приведено в [Дмитриев В.В., Ярг Л.А., 2008].

Полученные нами прочностные характеристики отобранных монолитов и подготовленных проб при одинаковой влажности непосредственно в поле приведены в таблице 3.

Таблица 3. Измеренные значения сцепления и угла внутреннего трения монолитов и «специально подготовленных проб» одного и того же грунта.
Table 3. Measured values of adhesion and internal friction angle of monoliths and "specially prepared samples" of the same soil.

Проба	**Супесь легкая, влажность 17 %**			**Песчаник, влажность 9 %**	
	Плотность, г/см^3	$tg\varphi$	**с, МПа**	**Плотность, г/см^3**	**с, МПа**
монолит	1,83	0,35	0,044	2,30	1,56
«подготовленная»	1,83	0,40	0,033	2,08	0,01

Проба	**Суглинок, влажность 14 %**			**Супесь, влажность 18 %**		
	Плотность, г/см^3	$tg\varphi$	**с, МПа**	**Плотность, г/см^3**	$tg\varphi$	**с, МПа**
монолит	2,03	0,45	0,174	1,95	0,45	0,064
«подготовленная»	2,04	0,35	0,108	1,98	0,25	0,087

Разброс в определении прочностных свойств составил (таблица 4):

Таблица 4. Погрешность определения значений сцепления и угла внутреннего трения между монолитами и «специально подготовленными пробами».
Table 4. Error in determining the values of adhesion and the angle of internal friction between monoliths and "specially prepared samples".

Вид грунта	**Погрешность определения *c*, МПа / %**	**Погрешность определения $tg\varphi$ / %**
Песчаный (сцементированный)	1,55/15500	-
Супесь	0,023/51	0,2/44
Супесь легкая	0,011/25	0,05/14
Суглинок	0,066/38	0,1/22

Погрешность при пробоподготовке превышает максимальную межлабораторную по [Дмитриев В.В., Ярг Л.А., 2008] для всех видов грунтов как по сцеплению, так и для угла внутреннего трения.

Методы испытания грунтов

Различают два основных вида испытаний грунтов на сдвиг как в полевых, так и в лабораторных условиях:

1. Консолидированно-дренированный или медленный срез. При таком испытании, уплотняющее нормальное давление выдерживается до стабилизации деформаций в грунте, после чего производится сдвиг грунта.

2. Неконсолидированно-недренированный или быстрый срез. При этом, характеристики грунта (плотность и влажность) не изменяются, то есть консолидация, которая связана с отжатием воды из грунта, отсутствует как при нормальном загружении, так и при сдвиге [Алексеев В.М., 2011].

«В практике исследований грунтов применяют метод среза грунта по фиксированной плоскости в приборах одноплоскостного среза. Различают две основные схемы опыта: медленный срез предварительно уплотненного до полной консолидации образца грунта (консолидировано-дренированное испытание) и быстрый срез без предварительного уплотнения, но всегда нагруженного (!) грунта – наше примечание – (неконсолидировано-недренированное испытание)» [Горбунов-Посадов М.И., Ильичев В.А. и др., 1985].

Нами проводились массовые опыты по схеме быстрого среза. Во всех случаях, после приложения нормальной нагрузки, рекомендованной таблицей 1 ГОСТ 20276.4[7], образец менял свои характеристики – плотность и влажность. В качестве иллюстрации приведем следующие данные (таблица 5).

Таблица 5. Изменения плотности и влажности супеси при проведении неконсолидированного (быстрого) среза при приложении нормального давления 0,15 МПа.
Table 5. Changes in the density and humidity of sandy loam during unconsolidated (fast) cutting when applying a normal pressure of 0.15 MPa.

Плотность, г/см^3		**Весовая влажность, %**	
До опыта	**После опыта**	**До опыта**	**После опыта**
1,39	1,52	10	9
1,29	1,40	20	18
2,01	2,10	25	21
1,83	1,95	25	20

Лабораторные методы

Наиболее часто в практике для определения прочностных характеристик используются лабораторные методы. Сравнительный анализ (таблица 6) показал, что результаты определения сцепления одного и того же монолита методами трехосных консолидировано-дренированных испытаний и одноплоскостного среза даже связных грунтов различаются в разы. Опять вынуждены констатировать, что не имеет смысла проводить дорогостоящие лабораторные исследования для получения недостоверных данных.

При проведении стандартного, описанного соответствующим ГОСТ 12248.1–2020, сдвигового определения прочностных характеристик, строят зависимость $\tau = f(\sigma)$ путем определения сдвигающего напряжения при не менее чем трех различных значениях σ_Z (п.5.3).

Угол внутреннего трения φ и удельное сцепление c определяют как параметры полученной линейной зависимости $\tau = f(\sigma)$(п. 9.2 ГОСТ 12248.1-2020).

При испытаниях в статическом режиме срезающая нагрузка передается ступенями по 5 % от значения нормальной нагрузки, при которой проводят срез. Не реже чем через каждые 2 мин после передачи ступени нагрузки проводится измерение деформации среза, уменьшая интервал между измерениями до 1 мин в период затухания деформаций до ее условной стабилизации. Критерием завершения ступени нагружения является достижение скорости деформации среза, не превышающее 0,01 мм/мин. (п. 8.10 ГОСТ 12248.1–2020).

[7] ГОСТ 20276.4-2020 Грунты. Метод среза целиков грунта

Таблица 6. Сравнительные результаты лабораторных определений прочностных свойств грунтов различными методами.

Table 6. Comparative results of laboratory determinations of strength properties of soils by various methods.

ИГЭ	Грунт	Скв.	h, м	Трехосные консолидировано-дренированные испытания		Консолидированный одноплоскостной срез		Прил. 1 Таблица 2 СНиП 2.02.01	
				c, МПа	φ, град	c, МПа	φ, град	c, МПа	φ, град
20	Глина полутв.	14	15,5	0,045	19	0,088	20	0,059	19
14	Супесь	3	17,6	0,044	31	0,108	32		
11	Глина полутв.	15	9,4	0,048	19	0,079	19	0,059	19
21	Супесь полутв.	Н-13	9,9	0,041	25	0,092	22	0,015	27
21	Супесь твердая	Н-13	9,5	0,041	25	0,154	24	0,021	30
15а	Песок пылеватый	3	12,9	0,011	33	0,018	24,5	0,005	32

При испытаниях в кинематическом режиме горизонтальные нагрузки и деформации среза фиксируют через 0,25—0.5 мм та, чтобы накопилось 15—20 отсчетов от начала до конца среза (п. 8.11 ГОСТ 12248.1–2020).

На рисунке 1 приведен график смещений сдвижной обоймы при проведении быстрого среза монолита супеси прибором Литвинова. Согласно методике проведения испытаний [Петраков А.А., Яркин В.В. и др., 2004] за начало разрушения образца грунта принимается либо резкое нарастание незатухающих деформаций среза, либо в случае, при котором полное перемещение среза превышает в опыте 4 мм (в примере сдвигающее напряжение 0,05 МПа). По первому варианту вопросов нет (примерно 10% случаев проведения опытов с различными грунтами). Применительно к остальным 90% случаев данная методика не содержит пояснений о причинах выбора величины критерия разрушения в размере 4 мм. Как видно из рисунка 1, а, срез идет по степенному закону, если предположить, что тенденция продолжится, как минимум, до центра образца (2,8 см), то простая экстраполяция дает окончательное значение тангенциального напряжения 0,12 МПа.

Подобная проблема имеет место и при проведении полевых испытаний, по методике приведенной, например, в ГОСТ 20276— 2012. В этом случае, испытания прекращаются при смещении кольца-обоймы на 2—3 см [Алексеев В.М., 2011]. При опытах на ПЛЛ-9 (полевая лаборатория Литвинова) абсолютное смещение должно превысить 4 мм при радиусе обоймы 28,2 мм; во втором – 2—3 см при радиусе – 20 см. В обоих случаях, достаточным считается относительное смещение по отношению к диаметру на 14% и больше, хотя в ГОСТ 20276 считается достаточным, если общая деформация среза превысит 10 % (п. 8.4.5). В литературе объяснения этому мы не нашли.

При проведении лабораторных опытов возникают еще два трудноразрешимых вопроса.

Первый. Давление (напряжение) σ_Z достигается приложением нормальной силы F_Z к площади поверхности S испытуемого образца. Тангенциальное сдвиговое напряжение определяется отношением силы, приложенной к сдвигаемой обойме, отнесенной к площади среза. Однако, давление в общем понимании равное $\tau = F_\tau/S$, в данном случае использовать нельзя, поскольку мы имеем дело не с площадью воздействия (среза), а с некоторым объемом, на который воздействует сдвигающая сила. При проведении опыта в лаборатории, воздействию (сжатию и срезу) подвергается значительная часть объема грунта (в зависимости от влажности и связности грунта – от 50 до 100%), т.е. мы имеем дело с внутренними – объемными – характеристиками [Лужнов Ю.М., Александров В.Д., 2013]. Сцепление и внутреннее трение преодолевается во всем ***объеме*** образца. Таким образом, в зависимости Кулона налицо несоответствие размерностей.

В левой части уравнения тангенциальная (сдвигающая) сила, отнесенная к объему разрушаемой (и сминаемой) части пробы с физической точки зрения является плотностью

силы; свободный член уравнения – сцепление – имеет ту же размерность (кг/(м^{2}с^2)). Нормально действующая сила приложена к верхнему срезу пробы, т.е. к площади и имеет размерность давления.

Для соответствия размерностям запишем уравнение Кулона в следующем виде:

$$\tau_i = (tg\varphi) \cdot \sigma_{Zi}/h + c$$

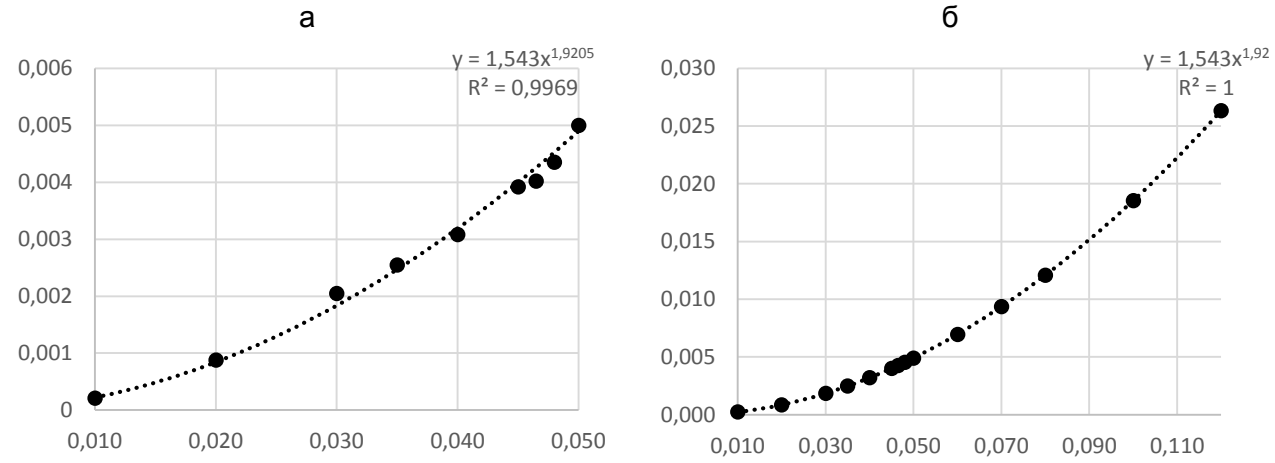


Рисунок 1. Зависимость смещения сдвижной обоймы ПЛЛ-9 от приложенного тангенциального напряжения: а) измеренный диапазон смещения до 5 мм; б) экстраполированный диапазон смещения до 28 мм.

Figure 1. Dependence of the displacement of the sliding cage PLL-9 on the applied tangential voltage: a) measured displacement range up to 5 mm; b) extrapolated displacement range up to 28 mm.

Второй. При проведении лабораторного испытания на быстрый срез прибором Литвинова в нашем конкретном случае мы имеем дело с монолитом грунта объемом 50 см^3. При этом срезается часть монолита определенного объема по плоскости соприкосновения с основной частью, площадь среза – 15% от 25 см^2 и сминается дополнительный объем, прилегающий к сдвигающей и удерживающей частям стенок обоймы. Но в природных условиях для среза (и смятия) того же объема грунта необходимо приложить несколько большее усилие, поскольку сдвигаемый объем «зафиксирован» со всех сторон таким же грунтом с наличием тех же структурных связей.

Следовательно, значение сопротивления срезу, получаемое нами при проведении быстрого среза, меньше, чем истинное.

Согласно п. 5.6 ГОСТ 12248.1–2020, образцы должны иметь форму цилиндра диаметром не менее 70 мм и высотой от 1/3 до 1/2 диаметра. Максимальный размер фракции грунта (включений, агрегатов) в образце должен быть не более 1/5 высоты образца. При проведении опыта, структура связного грунта в образце разрушается на 50–100%, т.е. *внутреннее* сцепление монолита разрушается в некоторой части сдвигаемого объема, *внутреннее* трение преодолевается в этом же объеме.

Сразу можно сделать вывод, что лабораторные исследования на неконсолидированный срез занижают значение сопротивления срезу на 10—50% в зависимости от размера образца.

Кроме того, поскольку площадь открытой «несвязной» поверхности имеет полиномиальную зависимость второго порядка от радиуса пробы при одной и той же высоте сдвижного кольца, то и выявленная ошибка будет нелинейно зависеть от размера монолита (таблица 7).

Таблица 7. Зависимость несвязной открытой площади образцов грунта от радиуса при постоянной высоте кольца 2 см.
Table 7. The dependence of the incoherent open area of soil samples on the radius at a constant ring height of 2 cm.

Показатель, единица измерения	Радиус образца, см				
	2,8	**10**	**20**	**50**	**100**
Площадь основания, $см^2$	25	314	1256	7850	31400
Площадь боковой поверхности, $см^2$	35	126	251	628	1256
Суммарная площадь поверхности образца, $см^2$	60	440	1507	8478	32656
Объем образца, $см^3$	50	628	2514	15710	62840
Относительное увеличение площади разрушаемой поверхности, $см^2$	2,41	1,40	1,20	1,08	1,04
Отношение площади поверхности образца к его объему, $см^{-1}$	1,20	0,70	0,60	0,54	0,52

При увеличении размеров монолита, относительное увеличение площади воздействия при сдвиге за счет боковой поверхности при постоянной высоте пробы, будет уменьшаться. Кроме того, ошибка в определении прочностных характеристик будет падать сообразно уменьшению отношения площади поверхности образца к его объему.

Полевые методы

Испытания грунтов на срез в полевых условиях чаще всего проводят способом среза целика по фиксированной горизонтальной или вертикальной поверхности в выработке (расчистке, котловане, шурфе, штреке и т. п.) касательной нагрузкой при одновременном нагружении целика грунта нагрузкой, нормальной к плоскости среза (п.7.4 ГОСТ 20276.4–2020)

Из всех полевых испытаний грунта на срез только метод среза целиков позволяет непосредственно определить прочностные характеристики грунта: сопротивления грунта срезу τ, угол внутреннего трения φ и удельное сцепление с (п. 4.1 ГОСТ 20276.4-2020).

При проведении испытания по схеме консолидированно-дренированного (медленного) среза, согласно п. 7.2 ГОСТ 20276.4–2020, каждую ступень давления при предварительном уплотнении необходимо выдерживать не менее 5 мин для крупнообломочных грунтов и песков и не менее 30 мин — для глинистых грунтов. За критерий условной стабилизации деформации сжатия принимают приращение осадки целика, не превышающее 0,05% за время, указанное в таблице 2 ГОСТ 20276.4–2020. Для пылеватых песков и глинистых грунтов – не менее 120 мин дополнительно. Сам срез – 3–5 мин. За критерий условной стабилизации среза принимают приращение перемещения кольца в плоскости среза, не превышающее 0,1 мм за время, указанное в таблице 2 ГОСТ 20276.4–2020. При непрерывно возрастающей касательной нагрузке скорость среза должна быть постоянной и соответствовать указанной в таблице 8.3 ГОСТ 20276.4–2020. Деформации среза фиксируют не реже чем через 2 мин. Испытание следует считать законченным, если при приложении очередной ступени касательной нагрузки происходит мгновенный срез (срыв) одной части грунта по отношению к другой или общая деформация среза превысит 10%. После окончания испытания целики грунта следует разгрузить и отобрать из зоны среза две пробы грунта для определения влажности.

При проведении испытания по схеме неконсолидированно-недренированного (быстрого) среза, согласно п. 8.1 ГОСТ 20276.4–2020, на целик грунта передают сразу в одну ступень нормальное давление р, при котором будут проводить срез целика грунта. Сразу после передачи нормальной нагрузки проводят срез целика грунта не более чем за 5 мин с момента приложения нормальной нагрузки. При передаче касательной нагрузки ступенями их значения не должны превышать 10% значения нормальной

нагрузки, при которой проводят срез (п. 8.2 ГОСТ 20276.4–2020), и приложение ступеней должно следовать через каждые 15—30 с. При передаче непрерывно возрастающей касательной нагрузки скорость среза принимают в интервале 5–20 мм/мин так, чтобы срез произошел в течение указанного времени.

Минусы полевых испытаний.

1. Монолит вырезан со всех сторон, кроме основания.

2. Монолит забран в кольцо-обойму, которое препятствует его разрушению, следовательно, непонятен объем разрушений.

3. Монолит предварительно сдавливается нормальной нагрузкой, что приводит к изменению его структуры и влажности. Надо иметь в виду, что первичная структура грунта, особенно песчаников, при таком воздействии может быть разрушена.

4. Время подготовки опыта занимает несколько часов, что сводит на нет требование п. 8.1.5 ГОСТ 20276.4–2020: Испытания можно проводить в том числе для природного сложения и природной влажности. Отбор проб на влажность из зоны среза – нонсенс, грунт разрушен, следовательно, объемную влажность мы не определяем, за несколько часов подготовки и проведения опыта с учетом отжима влаги при нормальном нагружении влажность изменится кардинально.

Выводы

1. Исследования сдвиговых характеристик грунтов общепринятыми методами, такими как одноплоскостной срез и трехосное сжатие, показывают значительные погрешности до 100 и более процентов, не позволяющие с требуемой точностью измерять прочностные параметры, необходимые для проектирования и строительства сооружений лесной инфраструктуры.

2. Авторами отмечена существенная разница в оценке сцепления и угла внутреннего трения грунтов в естественном залегании и лабораторных «подготовленных» образцов. При отборе проб для испытаний происходит разрушение структуры монолитов грунта, принципиально изменяющее их плотность и влажность. Этот факт не учитывается при лабораторных испытаниях по стандартным методикам, что приводит к искажению результатов.

3. Кроме того, авторами было проведено испытание одной и той же пробы грунта различными методами с получением отличий в результатах в 2 и более раза. Это ставит под сомнение обоснованность применения данных методик. Полевые испытания грунтов, также не обеспечивающие ненарушенной структуры грунта, имеют целый ряд недостатков, приводящих к снижению точности определения прочностных характеристик.

4. Данные несоответствия, по нашему мнению, могут быть вызваны принципиально неверным подходом к определению параметров среза в указанных методиках. Сопротивление срезу рассматривается по отношению к плоскости среза, т.е. к параметру площади, в то время как необходимо учитывать значительный объем грунта, в котором также преодолевается внутреннее сопротивление. При этом возникает вопрос к соотношению высоты и диаметра образца в применяемых приборах, а также к приведению этих размеров к полевым условиям, где размеры монолитов, подверженных воздействию внешних нагрузок, принципиально иные.

Литература

Петраков А.А. Учебное пособие по курсу «Механика грунтов» / Петраков А.А., Яркин В.В., Таран Р.А., Казачек Т.В.; Под ред. Петракова А.А. Макеевка: ДонНАСА, 2004. 164 с.

References

Petrakov A.A., Yarkin V.V., Taran R.A., Kazachek T.V *Mekhanika gruntov Uchebnoe posobie [Mechanics of soils. Textbook]*. Editor Petrakova A.A. Makeyevka, DonNASA, 2004. 164 p. (In Russian).

Крамаренко В.В. Грунтоведение. Учебное пособие. Томский политехнический университет. Томск, 2011. 431 с.

Цытович Н.А. Механика грунтов. М.: Государственное издательство по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1963. 636 с.

Виноградов Ю.Б. Этюды о селевых потоках. Л.: Гидрометеоиздат, 1982. 144 с.

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

Пыхтеева Н.Ф., Букша В.В., Миронова В.И. Учебно-методическое пособие «Механика грунтов». Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2018. 116 с.

Литвинов И.М. Исследование грунтов в полевых условиях. Харьков: Углетехиздат, 1951. 196 с.

Алексеев В.М. Полевые методы исследования механических свойств грунтов: учеб. пособие / В.М. Алексеев, П.И. Калугин. Воронеж: Воронеж. гос. арх.-строит. ун-т.., 2011. 112 с.

Горбунов-Посадов М.И., Ильичев В.А., Крутов В.И. Основания, фундаменты и подземные сооружения. Справочник проектировщика. М.: Стройиздат, 1985. 480 с.

Лужнов Ю.М., Александров В.Д. Основы триботехники: учеб. пособие / Ю.М. Лужнов, В.Д. Александров; под ред. Ю.М. Лужнова. М.: МАДИ, 2013. 136 с.

Kramarenko V.V. *Gruntovedenie. Uchebnoe posobie [Soil science. Textbook]*. Tomsk, Publ. Tomsk Polytechnic University, 2011. 431 p. (In Russian).

Tsytovich N.A. *Mekhanika gruntov [Mechanics of soils]*. Moscow, Publ. State Publishing House for Construction, Architecture and Building Materials, 1963. 636 p. (In Russian).

Vinogradov Yu.B. *Etyudy o selevykh potokakh [Sketches about mudflows]*. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1980. 143 p. (In Russian).

Dmitriev V.V., Yarg L.A. *Metody i kachestvo laboratornogo izucheniya gruntov [Methods and quality of laboratory study of soils]*. M., KDU, 2008. 542 p. (In Russian).

Pykhteeva N.F., Buksha V.V., Mironova V.I. *Mekhanika gruntov. Uchebno-metodicheskoe posobie [Soil mechanics. Educational and methodical manual]*. Yekaterinburg, Ural University Publishing House, 2018. 116 p. (In Russian).

Litvinov I.M. *Issledovanie gruntov v polevyh usloviyah [Investigation of soils in the field]*. Kharkiv, Ugletekhizdat, 1951. 196 p. (In Russian).

Alekseev B.M., Kalugin P.I. *Polevye metody issledovaniya mekhanicheskih svojstv gruntov: ucheb. posobie [Field methods of investigation of mechanical properties of soils: textbook.]*. Voronezh. Publ. State Arch.-builds. University, 2011. 112 p. (In Russian).

Gorbunov-Posadov M.I., Ilyichev V.A., Krutov V.I. *Osnovaniya, fundamenty i podzemnyye sooruzheniya. Spravochnik proyektirovshchika. [Foundations, foundations and underground structures. Designer's Handbook]*. M., Stroyizdat, 1985. 480 p. (In Russian).

Luzhnov Yu.M., Alexandrov V.D. *Osnovy tribotekhniki: ucheb. posobie [Fundamentals of tribotechnics: textbook]*. Edited by Yu.M. Luzhnov. M, MADI, 2013. 136 p. (In Russian).

НАУЧНЫЕ ДИСКУССИИ
SCIENTIFIC DISCUSSIONS
ОТ РЕДКОЛЛЕГИИ

Уже при создании журнала «Гидросфера. Опасные процессы и явления» редколлегия считала важным предусмотреть в нем раздел «Научные дискуссии». Очевидно, что дискуссия – душа научно-исследовательского процесса. Однако особая важность целенаправленной организации дискуссий связана с изменением условий деятельности отечественного научного сообщества за последние 30 лет. В рамках советской системы считалось правильным публиковать в научных журналах преимущественно готовые результаты законченных работ. Журналов было немного и статьи в них были редкостью – современные ученые, при прочих равных условиях, обычно могут предъявить раз в 10 больше статей в рецензируемых журналах, чем их коллеги советского периода. С таким «экономным» подходом к журнальным статьям связана знакомая многим коллегам традиция затруднений при публикации в журналах дискуссионных, незаконченных и других «сомнительных», с общепринятых точек зрения, работ. Однако, в период интенсивного развития и наличия широкого фронта научных исследований в СССР возможность для дискуссий реализовывалась в альтернативной системе научного общения – на многочисленных различных по формату научных конференциях, совещаниях внутри ведомств и институтов, и отражалась в изданиях сборников трудов, считавшихся вполне рейтинговыми видами публикации.

Сейчас предполагается, что научное исследование (по открытой тематике) целесообразно и необходимо публиковать на всех этапах – постановки задачи, обоснования методики, сбора материала, анализа данных, обобщения результатов, формулировки выводов. Критерии эффективности научной деятельности, применяемые в последние десятилетия, прямо стимулировали лавинообразный рост числа научных публикаций и породили известные всем перекосы, связанные с тем, что качество научного содержания этих публикаций отнюдь не росло лавинообразно – скорее снижалось. При этом старая традиция по-прежнему дает о себе знать – члены редколлегии не раз и не два получали на свои статьи обширные рецензии из солидных журналов, содержание которых заключалось в изложении точки зрения рецензента на затрагиваемую проблему, опыта его работы по ней и развернутых указаний, как и о чем автору следовало бы писать. Фактически, таким образом предлагалось перенести научную дискуссию на редакционный стол, а статью публиковать лишь по её итогу и достижению консенсуса. Но кто сказал, что консенсус будет достигнут?

Место научных дискуссий – на страницах научных журналов, именно для этого в первую очередь журналы и предназначены. Наука, в еще большей степени, чем поэзия, вся – езда в незнаемое, и никто не обладает монополией на истину в живом и динамичном процессе научного исследования. Особая необходимость целенаправленной организационной поддержки научной дискуссии обусловлена продолжающимся кризисом российской науки, по крайней мере в хорошо знакомой нам области наук о Земле. Количество и качество исследователей продолжает сокращаться, научные лидеры прошлых поколений часто не имеют адекватной научной смены. В результате уходят в историю целые научные школы, исследовательский процесс уже явно теряет целостность, многие научные направления в России просто исчезают, либо не зарождаются, на фоне их активного развития в мировой науке.

Нередко, и это тоже личный опыт, проблемой является даже не ведение дискуссии, а просто получение рецензии на статью по теме, по которой в России специалистов не осталось. В таких условиях резко возрастает опасность возникновения монопольного положения оставшихся «дееспособными» научных направлений, школ и отдельных специалистов, прогрессирующего сокращения идейного и

предметного диапазона исследований. Представляется, что сохранение, или восстановление разнообразия мнений и направлений является важнейшей современной задачей для российской науки, единственно способной обеспечить её целостность и развитие.

Предваряемая этим вступлением статья Р.Я.Миньковской посвящена актуальной проблеме разработки ГОСТ «Морские устья рек», имеющей не только научное, но и существенное практическое измерение. Процесс рецензирования проходил сложно, статья вызвала много критических замечаний, и общее заключение было скорее отрицательным. Однако энергичная и компетентная защита автором своей точки зрения побудила редакцию опубликовать статью в расширенном формате, дав одновременно возможность высказаться и её критикам. Возможно, эта публикация вызовет не только расширенную и плодотворную дискуссию по затронутой проблеме, но и станет хорошим новым опытом для нашего журнала. Bonne chance!

УДК 551.468+006

DOI: 10.34753/HS.2023.5.1.89

ПРЕДЛОЖЕНИЯ К ГОСТ «МОРСКИЕ УСТЬЯ РЕК»

Р.Я. Миньковская

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Морской гидрофизический институт РАН», г. Севастополь, Россия

rosmink@yandex.ru

Аннотация. Междисциплинарная наука о морских устьях рек, выделенных в отдельный, комплексный географический объект, развивается путём синтеза океанологии и гидрологии, что требует применения терминов и определений этих смежных наук, адаптированных к устьевой тематике. В настоящее время нет нормативных документов, регламентирующих использование специальных терминов и определений в этой области знаний, что вызывает проблемы, связанные с отсутствием универсальности терминологии научных и прикладных работ, затрудняет их понимание, а иногда снижает качество и эффективность. Ранее действующие, в начале 70-х годов прошлого века, государственные стандарты устарели, а более поздние руководящие документы либо их дублируют, либо не отражают многих сторон научных исследований и не удовлетворяют современным требованиям к ним. Поэтому задача усовершенствования нормативной документации актуальна. На пути к её решению, на основе структурно-гидрологического районирования разнотипных морских устьев рек, а также критического анализа ранее разработанных стандартов, действующих руководств, наставлений и других литературных источников, разработаны термины и определения основных понятий науки о морских устьях рек. Для широкого обсуждения предлагается новая редакция 147 терминов и определений (в отличие от ранее стандартизированных 45), включающая 5 разделов, описывающих структуру и границы морского устья реки, его гидрографическую сеть, морфологические элементы, режим, явления, включая ледовые и опасные, а также устьевые процессы. Стандартизация предлагаемых

PROPOSALS TO THE STATE STANDARD "MARINE ESTUARIES"

Rosa Ya. Minkovskaya

Federal State Budgetary Institution of Science Federal Research Center "Marine Hydrophysical Institute of the Russian Academy of Sciences", Sevastopol, Russia

rosmink@yandex.ru

Abstract. The interdisciplinary science of marine estuaries as a separate, complex geographical object, develops through the synthesis of oceanology and hydrology, which requires the use of terms and definitions from these related sciences adapted to the estuarine theme. Currently, there are no regulatory documents on the use of special terms and definitions in this knowledge area, which causes problems associated with the lack of universal terminology in scientific and applied papers, makes it difficult to understand them, and sometimes reduces the quality and effectiveness. Old State standards from the early 1970s are outdated, and later guidance documents either duplicate them, or do not reflect many aspects of scientific research and do not meet modern requirements for them. Therefore, the task of improving regulatory documentation is relevant. On the way to its solution, on the basis of structural and hydrological zoning of different types of marine estuaries, and a critical analysis of previously developed standards, existing manuals, guidelines and other literary sources, terms and definitions of the basic concepts of the science of marine estuaries have been developed. A new edition of 147 terms and definitions is proposed for wide discussion (in contrast to the previously standardized 45 terms), which includes 5 sections describing the structure and boundaries of the marine estuary, its hydrographic network, morphological elements, regime, phenomena, including ice and dangerous phenomena, as well as estuarine processes. Standardization of the proposed terms can be useful for the unification of scientific works in the field of oceanography, hydrology of sea estuaries and related sciences, as well as practical application.

терминов может быть полезна для унификации научных работ в области океанографии, гидрологии морских устьев рек и смежных наук, а также практического применения.

Ключевые слова: морские устья рек; *стандартизация*; термины и определения; предложения к ГОСТ; структура и границы; гидрологическая сеть; морфометрические элементы; режим и районирование; явления и процессы.

Keywords: sea estuaries; standardization; terms and definitions; proposals to standard; structure and boundaries; hydrological network; morphometric elements; regime and zoning; phenomena and processes.

Введение

Несмотря на вступивший в силу Закон «О стандартизации в Российской Федерации»[1] разработке и обновлению нормативных документов, в частности ГОСТ и Руководящих документов (РД), касающихся использования терминологии в области исследования морских устьев рек, пока не уделяется должного внимания. Срок действия разработанных в 1973 г. ГОСТ 18451–73 – ГОСТ 18458–73 и ГОСТ 18179–73[2,3] истёк в 80-х годах прошлого века. ГОСТ 18457–73[2] состоял из одного раздела, «Морфологические элементы и составные части устьевой области реки», включающего 45 терминов, 40 % которых было посвящено гидрографической сети дельты и приливам, хотя многие устья рек бездельтовые и малоприливные (бесприливные). ГОСТ 18179-73[3] отражал особенности гидрологического режима водотоков и водоемов, за исключением устьев рек, что затрудняло его использование для описания этих географических объектов, включающих не только водотоки и водоёмы, но и устьевые взморья, а также особые водные объекты (проливы, плавни, родники, ледники, подземные воды).

Даже «базовые» гидрологические понятия: уровень воды и его составляющие, расход, сток воды и течения – требовали редакции, так как в устьях рек эти характеристики водного режима имеют свои особенности (например, разнонаправленность потоков, необходимость дифференцировать составляющие уровня воды, многообразие типов течений [Михайлов, 1998] и др.). Терминология в области исследования ледового режима, опасных явлений и процессов также была не адаптирована к морским устьям рек. Например, на устьевом взморье, при появлении неподвижного льда использовался термин «припай», а в устьевых водотоках и водоёмах – «ледостав». Одно и то же явление – перемещение плавучего льда под действием ветра и течений – для разных частей устья называлось по-разному («дрейф льда» и «ледоход»), что требовало обращения к п. 15 РД 52.10.879–2019[4] и к п. 128 ГОСТ 18179–73[3]. В этом заключалось неудобство для пользователей, вынужденных отыскивать трактовки терминов и определений в многочисленных, порой противоречивых и сомнительных источниках, чтобы понять и описать особенности режима, качества воды, явлений и процессов в морских устьях рек.

Указанный ГОСТ 18451–73 – ГОСТ 18458–73[2] и более поздние Руководящие документы (РД 52.10.879–2019[4]), как и отдельные публикации, из которых термины заимствованы, были перегружены примечаниями, сведениями о методиках определения различных

[1] О стандартизации в Российской Федерации: Федеральный закон РФ от 29.06.2015 г. № 162–ФЗ. [Электронный ресурс]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_181810/ (дата обращения: 01.02.2023).

[2] ГОСТ 18451–73 – ГОСТ 18458-73. Океанология. Термины и определения. Введ. 1974–07–01. М.: Государственный комитет стандартов Совета Министров СССР, 1973. 64 с.

[3] ГОСТ 18179–73. Гидрология суши. Термины и определения. Введ. 1974–07–01. М.: Государственный комитет стандартов Совета Министров СССР, 1988. 36 с.

[4] РД 52.10.879–2019. Руководящий документ. Руководство по гидрометеорологическому исследованию устьевых областей рек, впадающих в море. Введ. 2020–07–01, приказ Росгидромета № 549 от 08.11.2019. М.: Росгидромет, 2020. 86 с.

Minkovskaya R.Y. Proposals to the State Standard "Marine estuaries". *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2023, vol. 5, iss. 1, pp. 89–107. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2023.5.1.89.

характеристик, что не является терминологическим продуктом и предметом стандартизации в рамках ГОСТ Р ИСО 704–2010[5], п. 3 «Термины и определения» поскольку методики могут изменяться по мере развития технологий и науки. Методические указания и рекомендации оказались не универсальными для некоторых типов устьев рек. Например, предложенная в п. 4.4 РД 52.10.879–2019[4] методика определения речной границы устья по дальности распространения приливов или нагонов неприемлема для рек, со значительным уклоном устьевого участка реки или впадающих водопадом в море (р. Водопадная, р. Дюден и др.). Определить морскую границу устья по 90%-ной солёности моря при 10%-ом стоке реки (РД 52.10.879–2019[4], п. 4.4) невозможно для рек, одновременно опресняющих в половодье большую часть моря (реки Дунай, Днестр, Днепр и Южный Буг опресняют при половодье всю северо-западную часть Чёрного моря, формируя общую зону опреснения) или небольшое море целиком (Азовское), а также малоизученных рек (большинство малых рек).

Отсутствие унифицированной терминологии в рамках государственного стандарта в области исследования морских устьев рек приводит к неоднозначности трактовок терминов и определений не только в устьевой океанологии и гидрологии, но и в смежных отраслях знаний, законодательных актах, административных постановлениях, затрудняет для пользователей доступ к научной информации.

В отечественной и зарубежной литературе существует множество определений «устьевой области реки», «устья реки», «эстуария», «дельты», а также «опасных явлений», риск которых в устьях рек максимален. Кроме того, специальная отечественная литература зачастую «засоряется» неточно переведенными терминами из иностранных публикаций, что нарушает преемственность сложившегося в стране понятийного аппарата.

В некоторых работах термины и определения необоснованно усложнялись [Михайлов, Горин, 2012], а в ГОСТ 18451–73 – ГОСТ 18458–73[2] и РД 52.10.879–2019[4] практически не рассматривались явления и процессы, характерные для разнотипных морских устьев рек, не отражались научные знания, полученные в данном направлении в последние 50 лет.

Вопрос трактовки отдельных терминов и определений неоднократно поднимался и обсуждался в отечественной [Самойлов, 1952; Руководство, 1965; Чеботарёв, 1978; Щукин, 1974; Скриптунов, 1978; Полонский, Лупачёв, Скриптунов, 1992; Михайлов, 1998; Михайлов, Добровольский, Добролюбов, 2005; Иванов, Миньковская, 2008; Миньковская, 2009; Коротаев, 2012; Михайлов, Горин, 2012; Михайлов, Михайлова, Магрицкий, 2018; Миньковская, 2020 и мн. др.] и зарубежной литературе [Pritchard, 1967; Officer, 1976; Prandle, 2009; Crane, Solomon, 2010]. Однако это не привело к единому мнению в научном сообществе и разработке ГОСТ «Морские устья рек». Дискуссия по поводу объяснения и применения терминов науки о морских устьях рек ведётся среди отечественных учёных последние 70–80 лет, начиная с фундаментальной работы Самойлова И.В. [Самойлов, 1952, с. 9–26], предложившего выделить устьевую область реки (УОР) в отдельный географический объект, имеющий три компонента – приустьевой участок реки, устьевой участок реки и предустьевое взморье [Самойлов, 1952, с. 35]. В дальнейшем авторы в разных публикациях меняли трактовку одних и тех же терминов, в основном, следуя по пути их усложнения, что не увеличивало степень их понимания и применимости в практике. Поскольку основные результаты этой многолетней дискуссии уже изложены в вышеуказанных работах, в данной статье повторно они не приводятся.

Главным недостатком терминов и определений по устьевой тематике, предлагаемых в литературных источниках, было игнорирование основного требования к терминологическим системам: выбор из множества характеристик объектов и предметов исследования существенных характеристик, «которые являются

[5] ГОСТ Р ИСО 704-2010. Терминологическая работа. Принципы и методы. М.: Стандартинформ, 2012. 52 с.

как необходимыми, так и достаточными для определения объема понятия» (ГОСТ Р ИСО 704–2010[5], пп. 5.4.5). Следовательно, актуальной задачей стандартизации научной терминологии является разработка терминов и определений, которые будут однозначными, непротиворечивыми и релевантными для широкого круга пользователей [Бурый А.С., 2022].

Поэтому, на основе концепции морского устья реки как комплексного географического объекта, его структурно-гидрологического районирования, анализа нормативных документов и литературных источников, разработаны конкретные предложения по стандартизации в рамках ГОСТ «Морские устья рек» терминов и определений, наиболее часто использующихся в терминологических работах, научной, технической, административной и других областях знаний (ГОСТ Р ИСО 704–2010[5]).

Материалы

Разработка предложений к ГОСТ «Морские устья рек» базировалась на актуальных нормативных документах в области стандартизации терминов и определений, действующих на 01.01.2023 г. с изменениями и дополнениями (ГОСТ 1.5–2001[6]; Р 50.1.075–2011[7]; ГОСТ 1.5–2012[8]), а также на устаревших (ГОСТ 18451–73 – ГОСТ 18458–73[2]; ГОСТ 18179–73[3] и РД 52.10.879–2019[4]).

Критический анализ указанных нормативных документов и литературных источников [Самойлов, 1952; Руководство по гидрологическому исследованию морских устьев рек, 1965; Щукин, 1974; Скриптунов, 1978; Полонский, 1992; Доронин, 2007; Михайлов, 1998, 2012; Коротаев, 2012; Prandle, 2009; Crane, 2010] показал, что районирование морских устьев рек не всегда было корректным, потому что в устьевой участок реки включалась дельта [Самойлов, 1952, с. 35; Михайлов и др., 2005] и (РД 52.10.324–92[9], п.1.2.2), не относящаяся к этому участку устья. В связи с этим, в работе [Иванов, Миньковская, 2008, с. 18–35] впервые было выполнено районирование морского устья реки, с предложением выделить дельту в отдельный структурный компонент, а также было опубликовано Методическое руководство [Миньковская, 2009], в котором представлена обобщенная схема районирования (рисунок), дана критика применяющихся в устьевой океанографии терминов и определений и предложено их усовершенствование. Предлагаемая в указанных публикациях автора новая схема районирования морского устья реки была одобрена Гориным С.Л.[10]: «…в работе встречаются интересные предложения, которые при соответствующем обосновании и доработке могут быть приняты научным сообществом (например, многочленная схема районирования устьевых областей рек)». Это предложение в дальнейшем и было принято в работах [Михайлов, Горин, 2012; Михайлов, Михайлова, Магрицкий, 2018], в которых дельта также была выделена из устьевого участка реки и предложено считать, что УОР может состоять из четырёх частей: устьевой участок реки, дельта, эстуарий и устьевое взморье. В отличие от мнения указанных авторов (также изложенного в РД 52.10.879–61] показано, что в состав морского устья реки может входить 2–3 взаимосвязанных структурных компонента – устьевой участок реки и устьевое взморье (оба различной сложности), а

[6] ГОСТ 1.5-2001. Межгосударственная система стандартизации. Стандарты межгосударственные, правила и рекомендации по межгосударственной стандартизации. Общие требования к построению, изложению, оформлению, содержанию и обозначению. Введ. 2002–09–01. М.: Стандартинформ, 2010. 93 с.

[7] Р 50.1.075-2011. Рекомендации по стандартизации. Разработка стандартов на термины и определения. Введ. 28.03.2011, № 35-ст. М.: Стандартинформ, 2012. 20 с.

[8] ГОСТ Р 1.5-2012. Национальный стандарт Российской Федерации. М.: Стандартинформ, 2016. 33 с.

[9] РД 52.10.324-92. Методические указания. Гидрологические наблюдения и работы на гидрометеорологической сети в устьевых областях рек. М.: Гидрометеоиздат, 1993. 187 с.

[10] Горин С.Л. Рецензия на работу Р.Я. Миньковской «Термины и определения океанографии морских устьев рек. Методическое руководство», ФГБНУ ВНИРО. М. 2 с. Original Message. From: "Сергей Горин" gorinser@mail.ru To: <editor@ibss.iuf.net>

также дельта, иногда образующаяся на границе первых двух частей устья. Эстуарии, лиманы, лагуны, бухты и другие типы приёмных водоёмов, на которые целиком или частично распространяется влияние реки, относятся к простому устьевому взморью. В случаях, когда указанные водоёмы закрытого типа сообщаются через проливы с другими водоёмами или прилегающей частью моря, куда также может распространяться влияние реки, эти многокомпонентные устьевые взморья следует относить к сложным (рисунок).

а б

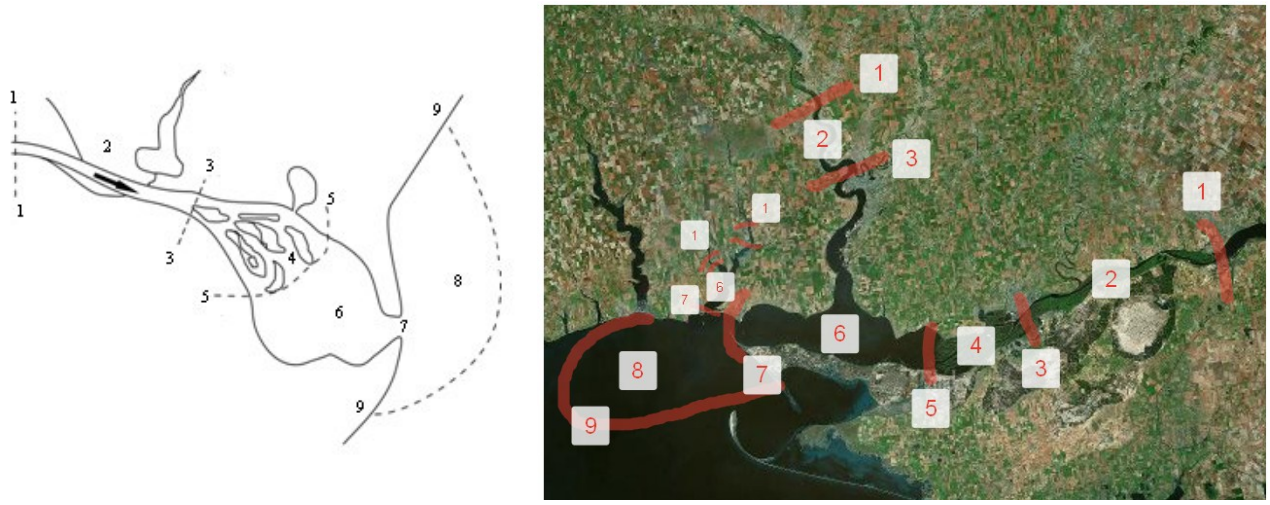


Рисунок. Обобщённая схема (а) районирования морского устья реки (МУР) и пример районирования Днепровско-Бугско-Березанского устьевого комплекса (б):
1 – верхняя (речная) граница МУР (ВГМУР), верхняя граница устьевого участка реки (ВГУУР); 2 – устьевой участок реки (УУР); 3 – нижняя граница УУР (НГУУР), верхняя граница дельты (ВГД); 4 – дельта (Д); 5 – нижняя граница дельты (НГД), верхняя граница устьевого взморья (ВГУВ); 6 – закрытое устьевое взморье (ЗУВ); 7 – пролив (П), нижняя граница ЗУВ; 8 – открытое устьевое взморье (ОУВ); 9 – нижняя (морская) граница МУР (НГМУР), нижняя граница устьевого взморья (НГУВ). При отсутствии дельты НГУУР совпадает с ВГУВ; при отсутствии ЗУВ – НГУУР или НГД является ВГУВ.

Figure. Generalized scheme (a) of the zoning of a marine estuary (ME) and an example of the zoning of the Dnieper-Bug-Berezansky estuary complex (b):
1 – the upper (river) border of the ME (UBME), the upper border of the estuary section of the river (UBE); 2 – the estuary section of the river (E); 3 – the lower border of the E (LBE), the upper boundary of the delta (UBD); 4 – delta (D); 5 – the lower boundary of the delta (LBD), the upper boundary of the estuarine seashore (UBES); 6 – closed estuarine seashore (CES); 7 – strait (S), the lower boundary of the CES; 8 – open estuarine seashore (OES); 9 – the lower (sea) border of the ME (LBME), the lower border of the estuarine seashore (LBES). In the absence of a delta, the LBE coincides with the UBES; in the absence of a CES, the LBE or LBD is the UBES.

Схемы районирования устьев рек в разных литературных источниках, зачастую, были несопоставимыми, обусловливая неоднозначность терминологии. Используемые термины иногда противоречили концепции устьевой области реки как специфического географического объекта или необоснованно усложнялись, что делало их малопонятными для неспециалистов и малопригодными для практиков [Миньковская, 2020].

Учитывая взаимосвязь гидрологических и геоморфологических процессов [Щукин, 1974; Михайлов, 1998; Коротаев, 2012], в основу разработки по усовершенствованию ГОСТ «Морские устья рек» (МУР) положено структурно-гидрологическое районирование (рисунок), предложенное в работах [Иванов,

Миньковская, 2008; Миньковская, 2009; Миньковская, 2020. с. 53–57]. В последней работе приводится анализ около 300 источников, в которых чаще всего использовались и трактовались по-разному предлагаемые термины и определения.

Основным принципом при формулировке терминов и определений были требования к ним, подробно изложенные в п. 5, 6 Р 50.1.075–2011[7], и п. 6.5 ГОСТ Р ИСО 704–2010[5]. Термины должны быть точными, однозначными, системными, краткими, лингвистически экономными, правильными и соответствовать выражаемому понятию. Не допускается их многозначность, «закольцованность» и синонимы. Определения, кроме перечисленного, должны включать только существенные признаки, без тавтологий, и быть достаточно конкретными, без расплывчатых «существенно», «могут входить», «могут быть», «больше», «меньше», «обычно», «более мелкие» «более крупные» и пр. т.п.

Обсуждение

По-видимому, неоднозначность применяемой научной терминологии явилась следствием затруднений при использовании разных критериев для районирования МУР: рельефа, экологических условий, гидрологических процессов. При этом не учитывалось влияние геоморфологических особенностей отдельных структурных компонентов на устьевые процессы и природу всего устьевого комплекса. То есть, нарушались принципы физико-географического районирования, а именно: однородности единиц районирования, универсальности, учёта закономерностей физико-географической дифференциации, простоты и удобства системы районирования разнотипных устьев, необходимости генетического подхода [Коротаев, 2012].

Дефиниция устьевой области реки (морского устья реки) неоднократно претерпевала редакцию. В качестве примера приведено распространённое в настоящее время определение термина «Устьевая область реки», которое с незначительными модификациями «кочует» из статьи в статью и транслируется во всех источниках, включая РД 52.10.324–92[9] (пп. 1.2.1) и РД 52.10.879–2019[4] (п. 4.1–4.2), а также пояснения, почему оно (и аналогичные ему определения) не пригодны для стандартизации.

«У*стьевая область реки (сокращенно УОР, синоним – устье реки) – это особый географический объект, охватывающий район впадения реки в приемный водоем (океан, море, озеро), сформировавшийся, существующий и развивающийся благодаря устьевым процессам: динамическому взаимодействию, смешению и внутримассовой трансформации водных масс реки и приемного водоема, отложению и переотложению речных и морских (озерных) наносов. Устьевая область реки может включать в себя до четырех частей: устьевой участок реки (нижний отрезок реки, подверженный воздействию приливов и/или нагонов), эстуарий, дельту, а также устьевую зону приемного водоема (часть приемного водоема, в пределах которой существенно влияние речного стока). УОР характеризуется специфичностью морфологического строения, гидрологического режима, и, как следствие, состава и трофической структуры населяющих ее сообществ живых организмов. УОР представляет собой гидрологический, морфологический, седиментологический, геохимический и биологический барьер между рекой и приемным водоемом»* [Михайлов, Горин, 2012, с. 245–246].

«У*стьевая область реки (сокращенно УОР, синоним – устье реки)…»*

Область – это часть территории, поэтому, если пользоваться предложенным термином, описание географического расположения УОР выглядит так: «устьевая *область* реки Волги расположена в Астраханской *области*». Поскольку термин «УОР» включает все типы устьев (морские, озёрные, океанические и пр. [Самойлов, 1952; Михайлов, 1998. с. 17]), а термин «устье реки» «обладает большой неопределённостью» [Михайлов, 1998. с. 10], целесообразно эти географические объекты в ГОСТ «Морские устья рек» конкретизировать термином «морское устье реки».

«…– *это особый географический объект,…»*

Все выделяемые в отдельные таксономические единицы географические объекты имеют свои особенности и специфику, иначе бы их не выделяли. Нет понятия «особый географический объект», есть «особые водные объекты» (подземные воды и ледники [Михайлов и др., 2005. с. 12]). К особым водным объектам также можно добавить снежный покров, проливы, плавни и родники, так как и они не являются водоёмами или водотоками. УОР как сложный комплексный географический объект может их включать.

«…охватывающий район впадения реки…»

Утверждение, что «устьевая *область* реки охватывает только *район* впадения реки», противоречиво и является алогизмом, увеличивающим объём определения и затрудняющим его понимание. В любой географической классификации «район» является соподчинённой «области» таксономической единицей. При районировании устьевой области реки, в неё включают несколько взаимосвязанных районов (устьевой участок реки–дельта–устьевое взморье).

«…в приемный водоем (океан, море, озеро),…»

Река может впадать в другую реку, водохранилище, пруд, болото, залив, лиман, бухту и др. водные объекты, а также может образовывать «слепое устье» различного типа, в том числе в результате антропогенного воздействия. В любом из этих случаев формируется УОР [Чеботарев, 1978. с. 282], а не только при впадении в океан, море, озеро. При этом, устьевые процессы при впадении реки в солоноводный водоём или пресноводный водоток будут иметь свои особенности. Поэтому понятие УОР имеет более широкий смысл, чем УОР, впадающих в океаны и моря [2,4] или «морское устье реки» [Руководство, 1965].

«…сформировавшийся, существующий и развивающийся благодаря устьевым процессам: динамическому взаимодействию, смешению и внутримассовой трансформации водных масс реки и приемного водоема, отложению и переотложению речных и морских (озерных) наносов.»

Формулировка неудачна синтаксически, поскольку слово «сформировавшийся» может относится в предложении к приёмному водоёму, а не к УОР (см. полный текст цитаты). Кроме того, определение сложной многокомпонентной системы, как УОР, путем перечисления образующих её элементов и процессов, всегда будет избыточным и неполным одновременно. Для стандартизации такие определения не могут быть использованы (ГОСТ Р ИСО 704–2010[5], п. 6.5).

«Устьевая область реки может включать в себя до четырех частей:…»

Количество компонентов устья зависит от принципа и критериев его районирования. Так, в работе [Михайлов, 1998, с. 25–26] только гидрологических классификационных признаков, по которым можно районировать устье, девять. Например, по мутности воды можно выделить шесть частей устья. В учебнике [Михайлов и др., 2005, с. 239] рекомендовано выделять две части устья по геоморфологическим признакам, а в работе [Самойлов, 1952, с. 35] – три. Сторонники теории «маргинального фильтра» выделяют в УОР, как минимум, пять частей, отличающихся стадиями биогеохимических процессов [Гордеев, 2012, с. 260–266]. В РД 52.10.879–2019[4], п. 4.3 и в статье [Михайлов, Горин, 2012] выделено четыре части устья. В работах [Иванов, Миньковская, 2008; Миньковская, 2009; Миньковская, 2020], в соответствии с предложенным структурно-гидрологическим районированием, выделено три структурных компонента морского устья реки, но не те, что в книге [Самойлов, 1952, с. 35].

«…устьевой участок реки (нижний отрезок реки, подверженный воздействию приливов и/или нагонов),…»

А также УУР может быть подвержен подпору (например, льдом в приёмном водоёме), проникновению солёной воды и др. явлениям и процессам, даже если устье бесприливное и преобладает штиль, т.е. нет сгонов и нагонов. Если река впадает в приёмный водоём водопадом, то приведенное определение не отражает всего многообразия устьевых явлений и процессов, характеризующих устьевой участок реки. Кроме того, «*отрезок реки*» не согласуется с понятием УОР, названной «географическим», а не

«водным» объектом, так как устьевым процессам подвержен не только сам водный объект, но и суша (дно, берега, пойма, грунтовые воды и пр.), которую он периодически затапливает и подтапливает.

«…эстуарий,…»

Далеко не все реки впадают в эстуарии, поэтому непонятно, почему авторы выбрали именно этот приёмный водоём и проигнорировали лиман, залив, лагуну, бухту, озеро, реку, водохранилище и множество других водных объектов, не имеющих отношения к эстуариям.

«…дельту, а также устьевую зону приемного водоема…»

Термина «*устьевая зона водоёма*» нет, такая «*зона*» не определена в пространстве и времени, поскольку у приёмного водоёма «устьевую зону» можно трактовать неоднозначно: там, где в него впадает река, называют «вершиной» эстуария, бухты и пр., а там, где водоём соединяется с морем или другим объектом, называют его устьем. Есть устьевое взморье [Михайлов и др., 2005. с. 239], (РД 52.10.879–2019[4], п. 4.3). И этот термин наиболее правильный.

«…(часть приемного водоема, в пределах которой существенно влияние речного стока).»

Невозможно определить «существенность» влияния речного стока, если в межень и паводок он влияет по-разному. К тому же, такая трактовка противоречит требованию Р 50.1.075–2011[7], разд. 6, п. 6.4 и ГОСТ Р ИСО 704–2010[5], п. 6.5 о недопустимости использования неопределённостей.

«УОР характеризуется специфичностью морфологического строения, гидрологического режима, и, как следствие, состава и трофической структуры населяющих ее сообществ живых организмов».

Это относится к любому географическому объекту, который выделяется в отдельную таксономическую единицу из-за своей специфичности, особенностей строения, режима биотических и абиотических компонент экосистемы. И устье не исключение [Коротаев, 2012; и др.]. Для стандартизации этот текст излишний (ГОСТ Р ИСО 704–2010[5], п. 6.5).

«УОР представляет собой гидрологический, морфологический, седиментологический, геохимический и биологический барьер между рекой и приемным водоемом».

Барьер (*фр. barrières*) – физическое препятствие (преграда, этап, заграждение, перегородка, стена, забор, перекладина и т.п.). УОР, как географический и водный объект не является физическим препятствием для явлений, процессов, биотической или абиотической составляющих экосистемы. Поскольку термин «барьер» вносит в определение УОР элемент неопределённости, в соответствии с требованиями Р 50.1.075–2011[7], п. 6.2, его включать в это определение не целесообразно.

Поэтому предлагается вместо громоздкого определения УОР, не отвечающего целям стандартизации терминов, ввести следующее определение: «Морское устье реки – комплексный географический объект, включающий естественные и искусственные водотоки, водоёмы и особые водные объекты, специфический рельеф и ландшафт, формирующийся при впадении реки в море под влиянием природных и антропогенных факторов, устьевых явлений и процессов, дальность распространения которых определяет границы устья».

Аналогично термину «УОР» были проанализированы наиболее часто употребляемые в устьевой океанологии и гидрологии термины, трактовка которых является дискуссионной. Предлагаемая редакция 147 терминов и определений к ГОСТ «Морские устья рек» представлена в таблице. В ней приоритетность геоморфологического подхода [Щукин, 1974; Коротаев, 2012] к структурно-гидрологическому районированию морских устьев рек, их типизации и разработке терминов и определений [Миньковская, 2020, с. 46–69], обусловлена относительной устойчивостью морфометрических характеристик по сравнению с гидрологическими, в бóльшей степени подверженными антропогенным изменениям. Поэтому в качестве приоритетного критерия, как при районировании устьев (рисунок), так и разработке терминологии (таблица), принималась

структура морского устья реки, которая обусловливает особенности режима и качества воды. Предлагаемые термины и определения, характеризующие морское устье реки как объект исследования, а также основные параметры его состояния, специфику явлений и процессов, систематизированы по тематике в пяти разделах таблицы.

Первый раздел таблицы «Структура и границы морского устья реки» включает 16 терминов, позволяющих по-новому осмыслить как само понятие «морское устье реки», так и новую редакцию терминов, предложенных для обозначения его частей и границ. В отличие от использующегося термина «устьевая область реки» ГОСТ 18457–73[2], п. 1, [Михайлов, 1998, 2012, с. 10, 11] предлагается вернуться к термину «морское устье реки» [Руководство, 1965], более конкретно и детально характеризующему водный объект, формирующийся под влиянием реки, моря, суши, атмосферы и хозяйственной деятельности [Миньковская, 2020]. В то же время, определение «морского устья реки» более универсальное, поскольку подходит для любого типа МУР, независимо от того, в море, океан или иной приёмный водоём, впадает река.

Кроме естественных процессов, в настоящее время существенное воздействие на устья, особенно малых рек, может оказывать хозяйственная деятельность. В предлагаемом (таблица) определении термина «морское устье реки» эти аспекты учтены.

Таблица. Термины и определения, предлагаемые к стандартизации
Table. Terms and definitions proposed for standardization

1 Структура и границы морского устья реки	
Термин	**Определение**
1.1 морское устье реки (МУР)	Комплексный географический объект, включающий естественные и искусственные водотоки, водоёмы и особые водные объекты, специфический рельеф и ландшафт, формирующийся при впадении реки в море под влиянием природных и антропогенных факторов, устьевых явлений и процессов, дальность распространения которых определяет границы устья.
1.2 верхняя граница морского устья реки (ВГМУР)	Речная граница распространения устьевых процессов, совпадающая с верхней границей устьевого участка реки или дельты.
1.3 нижняя граница морского устья реки (НГМУР)	Мористая граница распространения устьевых процессов, совпадающая с нижней границей устьевого взморья реки.
1.4 устьевой участок реки (УУР)	Участок от верхней границы морского устья реки до верхней границы дельты или до нижней границы устьевого участка реки (при отсутствии дельты), на котором проявляются устьевые процессы.
1.5 простой устьевой участок реки	Устьевой участок реки, с выраженными устойчивыми границами, естественным бесприточным основным руслом, с постоянным стоком в нём.
1.6 сложный устьевой участок реки	Устьевой участок реки, с невыраженными или неустойчивыми границами, антропогенными изменениями, сложной гидрографической сетью, постоянным или временным стоком.
1.7 нижняя граница устьевого участка реки (НГУУР)	Граница раздела между устьевым участком реки и устьевым взморьем, совпадающая с его верхней границей (при наличии дельты совпадает с её верхней границей).
1.8 дельта (Д)	Часть морского устья реки, образованная полиморфными осадками различного генезиса в процессе дельтообразования, в пределах которой происходит деление основного водотока на рукава и формируется гидрографическая сеть и ландшафт устья.
1.9 дельта заполнения	Дельта, сформированная на закрытом устьевом взморье при преобладании речных факторов.
1.10 дельта выдвижения	Дельта, сформированная на открытом устьевом взморье под влиянием речных и морских факторов.
1.11 дельта наложения	Дельта, сформированная на поверхности существующей дельты в условиях преобладания речных факторов.

Продолжение таблицы

1 Структура и границы морского устья реки	
Термин	**Определение**
1.12 верхняя граница дельты (ВГД)	Место отделения от основного водотока (или главного рукава) первого устьевого рукава.
1.13 нижняя граница дельты (НГД)	Граница раздела между дельтой и устьевым взморьем, проходящая по контуру берега между устьями рукавов, совпадающая с верхней границей устьевого взморья.
1.14 устьевое взморье (УВ)	Часть морского устья реки, от нижней границы дельты или нижней границы устьевого участка реки до нижней границы морского устья реки, в которой проявляется влияние речных факторов.
1.15 простое устьевое взморье	Устьевое взморье, включающее частично или полностью один приёмный водоём.
1.16 сложное устьевое взморье	Устьевое взморье, включающее более одного приёмного водоёма.
2 Гидрографическая сеть морского устья реки	
2.1 гидрографическая сеть морского устья реки	Совокупность естественных и искусственных, постоянных и временных водотоков, водоёмов и особых водных объектов (плавни, родники, проливы и др.) в пределах морского устья реки.
2.2 русловая сеть морского устья реки	Совокупность русел водотоков в пределах морского устья реки.
2.3 устьевой водоток	Элемент русловой сети морского устья реки естественного или искусственного происхождения, характеризующийся движением воды в любом направлении.
2.4 основной водоток (основное русло)	Устьевой водоток, являющийся естественным продолжением реки, имеющий речное морфологическое строение русла, по которому осуществляется основной сток.
2.5 устьевой рукав	Ответвление русла устьевого водотока, имеющее речное морфологическое строение, по которому осуществляется транзит части стока основного водотока или главного рукава.
2.6 главный рукав	Рукав, от которого ответвляются другие рукава, транспортирующие части его стока.
2.7 протока (проток)	Устьевой водоток, без речных русловых образований, ответвляющийся от рукава или основного русла и впадающий в них же или другие водные объекты.
2.8 ерик	Небольшой узкий внутридельтовый, пойменный или островной проток, соединяющий устьевые водотоки или устьевые водоёмы с водоёмами.
2.9 узел разветвления водотоков	Элемент русловой сети морского устья реки, характеризующийся разветвлением одного устьевого водотока на два и более.
2.10 узел соединения водотоков	Элемент русловой сети морского устья реки, характеризующийся соединением двух и более устьевых водотоков в один.
2.11 устье водотока (устье рукава)	Створ, где устьевой водоток впадает в водный объект; растекается по поверхности суши; инфильтруется; дренируется; отмечается прекращение стока.
2.12 бороздина*	Подводное русло потока на устьевом взморье.
2.13 устьевой водоём	Элемент гидрографической сети морского устья реки, характеризующийся скоплением воды в естественных или искусственных понижениях суши.
2.14 приёмный водоём	Устьевой водоём (или часть моря), в который непосредственно впадают устьевые водотоки.
2.15 открытый приёмный водоём (открытое устьевое взморье, ОУВ)	Приёмный водоём, имеющий свободный обмен с прилегающей акваторией по всему периметру.
2.16 закрытый приёмный водоём (закрытое устьевое взморье, ЗУВ)	Приёмный водоём, ограниченный по периметру береговой чертой и имеющий обмен с прилегающей к нему акваторией через устьевой пролив (гирло).
2.17 устьевой пролив (гирло)	Сужение устьевого водоёма в месте соединения с прилегающей акваторией, составная часть устьевого взморья.

Продолжение таблицы

1 Структура и границы морского устья реки	
Термин	**Определение**
2.18 приглубый приёмный водоём (приглубое устьевое взморье)	Приёмный водоём, глубина которого в несколько раз больше глубины впадающего в него водотока.
2.19 отмелый приёмный водоём (отмелое устьевое взморье)	Приёмный водоём, глубина которого соизмерима с глубиной впадающего в него водотока.
2.20 залив	Вдающаяся в сушу не отчленённая или слабо отчленённая часть водоёма, имеющая с ним свободный водообмен и сходный режим.
2.21 бухта	Вдающаяся в сушу часть водоёма, имеющая с ним водообмен через пролив, обладающая специфическим режимом закрытого устьевого водоёма.
2.22 лагуна	Малопроточный закрытый устьевой водоём с намывными берегами, вытянутый вдоль побережья, отделённый от смежного водного объекта пересыпью, косами, устьевым баром или волноприбойным валом.
2.23 лиман	Проточный закрытый устьевой водоём, вытянутый поперек побережья, сформированный в затопленном устье речной долины при незначительных приливно-отливных течениях, отделенный косами и мысами от смежного водоёма.
2.24 риа	Глубоко вдающаяся в сушу бухта, представляющая собой затопленную морем эрозионную речную долину, сложенную остаточными массивами.
2.25 эстуарий	Воронкообразный, вытянутый поперёк побережья, закрытый приёмный водоём, сформированный под влиянием приливно-отливных течений в затопленном устье речной долины.
2.26 фиорд	Затопленная морем долина реки, с высокими коренными берегами, эрозионно-тектонического происхождения, приглубый устьевой водоём закрытого типа, близкий к эстуарию.
2.27 лимано-лагуна	Устьевой приёмный водоём закрытого типа, сочетающий свойства лимана (вершинная часть) и лагуны (устьевая часть).
2.28 устьевое озеро	Замкнутый по периметру естественный водоём, элемент гидрографической сети морского устья реки, различного происхождения, минерализации и проточности, а также конечная стадия развития некоторых морских устьев рек.
2.29 лагуно-озеро	Устьевое озеро, лагунного типа, образовавшееся после естественного или искусственного отчленения лагуны от моря.
2.30 лимано-озеро	Устьевое озеро, лиманного типа, образовавшееся после естественного или искусственного отчленения лимана от моря.
2.31 марш (осушка)	Эпизодически затапливаемый, зарастаемый участок побережья устьевого взморья в виде узкой полосы, поздняя стадия развития лагуны.
2.32 плавни	Затопленные или заболоченные большую часть года, заросшие пойменные территории, с травяными болотами и старицами.
2.33 болото	Переувлажнённые участки поверхности суши и почво-грунтов, а также водные объекты в стадии угасания, характеризующиеся слабой проточностью, водолюбивой растительностью и процессами торфообразования.
2.34 источник	Постоянный или временный особый нерусловой водный объект, образующийся при естественном выходе подземных вод на поверхность суши или в водный объект.
2.35 старица (староречье)	Остаточный пойменный водоём, образовавшийся из отчленившегося от русловой сети ранее существовавшего участка водотока.
2.36 ветланды	Общее название водно-болотных угодий, любого генезиса и минерализации воды.
3 Геоморфологические элементы морских устьев рек	
3.1 устьевые образования	Русловые и нерусловые, подвижные и неподвижные скопления наносов различного генезиса и продуктов разрушения суши в морском устье реки.

Продолжение таблицы

1 Структура и границы морского устья реки	
Термин	**Определение**
3.2 русло водотока (коренное)	Выработанное потоком ложе, по которому осуществляется сток без затопления поймы.
3.3 пойма	Периодически затапливаемая часть ложа долины устьевого участка реки, сложенная наносами, ограниченная прирусловыми валами (бровками русла) и склонами долины.
3.3 побочень	Обсыхающая в межень прибрежная гребневая часть ленточной гряды, пересекающей русло водотока.
3.4 устьевая яма	Эрозионная форма рельефа дна, обусловленная размывом русла устьевого водотока или ложа устьевого водоёма.
3.5 прирусловой вал	Отложения наносов и грунта вдоль русел водотоков, обусловленные взаимодействием потока и русла, а также искусственные защитные сооружения для предотвращения затопления поймы.
3.6 излучина (меандр)	Изгиб устьевого водотока или узкого удлинённого водоёма, ограниченный смежными точками перегиба осевой линии.
3.7 свал глубин	Подводный склон, характеризующийся резким увеличением уклона дна и глубины водного объекта.
3.8 устьевой бар	Аккумулятивные образования на устьевом взморье реки в форме осерёдков, гряд или валов, отчленённых от берегов.
3.9 устьевая коса	Свободное аккумулятивное образование различного генезиса и состава, примыкающее корневой частью к берегу.
3.10 конус выноса	Подводная часть аккумулятивного образования в приёмном водоёме, в форме слабовыпуклого полуконуса, вершина которого примыкает к устью водотока, а надводная часть представляет собой дельту.
4 Режим и гидрологическое районирование морских устьев рек	
4.1 уровень воды	Отклонение поверхности воды в водном объекте морского устья реки от постоянной плоскости сравнения, называемой нулём графика гидрологического поста.
4.2 абсолютная составляющая уровня воды	Составляющая уровня воды, обусловленная изменением количества воды в водном объекте морского устья реки.
4.3 относительная составляющая уровня воды	Составляющая уровня воды, обусловленная перекосом водной поверхности под воздействием различных сил.
4.4 стоковая составляющая уровня воды	Составляющая уровня воды, обусловленная стоком воды.
4.5 сгонно-нагонная составляющая уровня воды	Составляющая уровня воды, обусловленная сгонами и нагонами.
4.6 приливо-отливная составляющая уровня воды	Составляющая уровня воды, обусловленная приливами и отливами.
4.7 сток воды	Объём воды, проходящий через поперечное сечение устья в перпендикулярном ему направлении за какой-либо промежуток времени. Сток воды за секунду называется расходом воды.
4.8 сток тепла	Количество тепла, переносимое за какой-либо промежуток времени через поперечное сечение устья в перпендикулярном ему направлении. Сток тепла за секунду называется расходом тепла.
4.9 сток вещества	Количество растворённого или взвешенного вещества, переносимое за какой-либо промежуток времени через поперечное сечение устья в перпендикулярном ему направлении. Сток вещества за секунду называется расходом вещества.

Продолжение таблицы

1 Структура и границы морского устья реки	
Термин	**Определение**
4.10 регулирование стока	Естественное или искусственное перераспределение стока во времени путём уменьшения его максимальных и увеличения минимальных значений.
4.11 внутригодовое распределение стока воды	Долевое (или процентное) отношение стока отдельных периодов года к величине стока за гидрологический год.
4.12 распределение стока (расхода) по рукавам	Деление объёма воды (тепла или вещества) на части в узле разветвления водотоков или сложение объёмов воды (тепла или вещества) в узле соединения водотоков.
4.13 приливный расход воды	Расход воды, поступающий из моря в морское устье реки в любой момент прилива.
4.14 отливный расход воды:	Расход воды, поступающий из морского устья реки в море в любой момент отлива.
4.15 средний приливный расход воды	Объём воды, поступившей из моря в морское устье реки во время прилива, делённый на продолжительность прилива.
4.16 средний отливный расход воды	Объём воды, поступившей из морского устья реки в море во время отлива, делённый на продолжительность отлива.
4.17 результирующий расход за приливо-отливный цикл	Результат алгебраического суммирования среднего приливного и среднего отливного расходов воды.
4.18 кривая местного прилива	Хронологический график колебания уровня воды в любом створе приливо-отливной зоны.
4.19 мгновенный профиль прилива (отлива)	Продольный профиль поверхности воды в приливо-отливной зоне в определённый момент прилива (отлива).
4.20 геометрическое место полных вод (ГМПВ)	Линия, соединяющая отметки максимальных уровней прилива, независимо от момента их наступления.
4.21 геометрическое место малых вод (ГММВ)	Линия, соединяющая отметки минимальных уровней отлива, независимо от момента их наступления.
4.22 бор (накат, поророка, маскарэ)	Водяной вал, образующийся при приливах в устьевых водотоках некоторых рек.
4.23 время добегания	Время, за которое водная масса, расход или уровень воды будут наблюдаться на определённом расстоянии от начального створа.
4.24 неоднородное течение	Совокупность локальных течений различного генезиса в морском устье реки.
4.25 суммарное течение	Локальное течение, формирующееся при комплексном воздействии различных факторов.
4.26 стоковое течение	Направленное в сторону приёмного водоёма течение, обусловленное стоком реки.
4.27 бризовое течение	Периодическое течение на устьевом взморье, обусловленное бризами.
4.28 преобладающее течение	Наиболее часто повторяющиеся направление и местная скорость течения.
4.29 обратное течение	Течение различного генезиса, направленное от приёмного водоёма к вершине морского устья реки.
4.30 прямой поток	Поток воды, тепла или вещества в любом створе морского устья реки, направленный от реки к морю.
4.31 обратный поток	Поток воды, тепла или вещества в любом створе морского устья реки, направленный от моря к реке.
4.32 разнонаправленный поток	Поток воды, тепла или вещества в любом створе морского устья реки, состоящий из потоков прямого и обратного направления.

Продолжение таблицы

1 Структура и границы морского устья реки	
Термин	**Определение**
4.33 результирующий поток	Результат алгебраического суммирования прямого и обратного потоков, выражающийся в тех же единицах и имеющий направление (и знак) бóльшей составляющей.
4.34 область транзита	Часть морского устья реки, которую речные воды проходят транзитным потоком, зона адвекции речных вод.
4.35 область взаимодействия речной и морской воды	Часть морского устья реки, где происходит изменение физических, химических и биологических характеристик речной и морской воды.
4.36 нагонная часть морского устья реки	Часть морского устья реки, в пределах которой отмечаются нагонные колебания уровня воды.
4.37 приливо-отливная зона	Часть морского устья реки, в пределах которой отмечаются приливо-отливные колебания уровня воды.
4.38 участок с обратным течением	Часть морского устья реки, в которой отмечаются обратные течения.
4.39 область осолонения	Пресноводная часть морского устья реки, куда проникает солёная вода, осолоняя водную массу.
4.40 область опреснения	Солоноводная часть морского устья реки, куда распространяется речная вода, опресняя водную массу.
5 Устьевые явления и процессы	
5.1 перераспределение стока (расхода) по рукавам	Процесс изменения распределения стока по рукавам под влиянием природных и антропогенных факторов.
5.2 устьевое удлинение	Обусловленное природными и антропогенными причинами выдвижение русла водотока в приёмный водоём в результате отложения и переотложения наносов.
5.3 дельтообразование	Процесс отложения и переотложения наносов и материала разрушения суши, формирующий рельеф морского устья реки и его гидрографическую сеть.
5.4 взаимодействие речной и морской воды	Гидрофизические, гидрохимические, гидробиологические и геобиохимические процессы формирования водной среды и донных отложений морского устья реки в результате взаимодействия разнородных вод.
5.5 устьевой фронтогенез	Образование контрастной зоны раздела между разнородными водными массами в морском устье реки.
5.6 проникновение солёной воды	Процесс поступления солёной воды моря или осолонённой воды устьевого взморья в водные объекты морского устья реки.
5.7 адвективный обмен	Перенос воды, тепла или вещества разнонаправленными потоками через границу раздела между компонентами морского устья реки или пограничными с ним объектами за определенный период.
5.8 температурный бар	Зона раздела между водными массами с различной теплоактивностью, имеющая температуру наибольшей плотности и характеризующаяся конвергенцией вод.
5.9 сгонно-нагонные явления	Возникающая под действием ветра циркуляция вод, сопровождающаяся денивеляцией водной поверхности.
5.10 подпор	Повышение уровня воды, обусловленное увеличением сопротивления движению потока или препятствиями различного происхождения.
5.11 затопление территории	Постоянное или временное, природное или антропогенное покрытие территории поверхностными водами.
5.12 подтопление территории	Подъём или выход на поверхность подземных вод, отмечающийся постоянно или периодически и обусловленный различными причинами.
5.13 ледяной покров	Твёрдое агрегатное состояние поверхностного слоя воды устья.
5.14 неподвижный лёд	Сплошной или несплошной ледяной покров на поверхности водного объекта.
5.15 припай, ледостав	Неподвижный лёд любого возраста и ширины, прикреплённый к берегу устьевого взморья (припай) или устьевого водотока, водоёма (ледостав).

Продолжение таблицы

1 Структура и границы морского устья реки	
Термин	**Определение**
5.16 плавучий (дрейфующий) лёд	Ледяные образования различной номенклатуры, перемещающиеся под действием течения и (или) ветра.
5.17 сало, шуга	Начальные формы льда, образующиеся на разных стадиях ледообразования и при разных условиях замерзания воды.
5.18 внутриводный (донный) лёд	Лёд, образующийся из ядер кристаллизации в толще воды, скрепляющийся с грунтом дна или всплывающий на поверхность.
5.19 ледяные поля	Льдины более 100 м в поперечнике.
5.20 ледовитость	Степень покрытия акватории неподвижным и плавучим льдом, выраженная в баллах (от 0 до 10) или в процентах площади, занятой льдом, от общей площади обзора.
5.21 сплочённость льда	Характеристика плавучего льда в баллах, показывающая отношение площади льдин к общей площади акватории, занятой плавучим льдом.
5.22 наледь	Ледяное образование, возникающее в результате поступления и замерзания воды на поверхности сформировавшегося ледяного покрова.
5.23 закраина	Вдольбереговая полоса воды (до 1 м), образующаяся в результате таяния льда, отхода припая от берега, повышения уровня воды.
5.24 разводья	Участки воды в ледяном покрове, шириною 1–50 м, образующиеся при подвижках льда.
5.25 подвижка льда	Небольшое смещение ледяного покрова под действием динамических факторов.
5.26 промоина	Участок чистой воды в ледяном покрове, образующийся под действием сильного течения.
5.27 трещина	Разрыв ледяного покрова под действием различных факторов.
5.28 полынья прибрежная	Водное пространство (более 100 м) в ледяном покрове, примыкающее к побережью.
5.29 полынья заприпайная	Водное пространство в ледяном покрове, образующееся на границе между припаем и плавучим льдом.
5.30 сжатие льда	Деформация ледяного покрова, обусловленная изменением внешних воздействий на лёд, вызывающая его уплотнение, нагромождение льдин и торосообразование.
5.31 торошение льда	Нагромождение льда под воздействием природных и антропогенных факторов с последующим смерзанием ледяных образований.
5.32 дрейф льда (ледоход)	Горизонтальное перемещение льда под действием течения и (или) ветра.
5.33 затор льда	Стеснение поперечного сечения устьевого водотока нагромождением льда в период ледохода, вызывающее подпор уровня воды.
5.34 зажор льда	Стеснение поперечного сечения устьевого водотока шугой и донным льдом в период шугохода, вызывающее подпор уровня воды.
5.35 навалы льда на берега	Нагромождения плавучего льда на берегах водных объектов устья.
5.36 экзарация берегов и дна	Механическое воздействие движущегося льда на грунт, приводящее к изменению геоморфологических характеристик устья.
5.37 опасное гидрологическое явление (ОГЯ)	Гидрологическое явление, которое, при отсутствии защитных мер, может нанести ущерб природе, хозяйству или человеку.
5.38 особо опасное гидрологическое явление (ООГЯ)	Опасное гидрологическое явление, достигшее такой стадии развития, на которой среде, хозяйству или человеку наносится определённый ущерб.
5.39 катастрофическое гидрологическое явление (КГЯ)	Особо опасное гидрологическое явление, влекущее существенный материальный ущерб и человеческие жертвы.
5.40 комплексные явления	Совокупность явлений, имеющих разную степень опасности и обусловленных различными причинами.

Продолжение таблицы

1 Структура и границы морского устья реки	
Термин	**Определение**
5.41 опасное гидрохимическое явление (ОГХЯ)	Загрязнённость природной среды, обусловленная воздействием естественных и (или) антропогенных факторов, приводящая к сверхнормативному ухудшению качества воды.
5.42 особо опасное гидрохимическое явление (ООГХЯ)	Опасное гидрохимическое явление, при котором экстремальное ухудшение качества воды наносит определённый ущерб среде, хозяйству и человеку.
5.43 опасное экологическое явление (ОЭЯ)	Явление, которое может привести к гибели гидробионтов и нанести ущерб природной среде, хозяйству или человеку.
5.44 особо опасное экологическое явление (ООЭЯ)	Явление, приводящее к гибели гидробионтов, деградации водной экосистемы и наносящее определённый ущерб природной среде, хозяйству или человеку.
5.45 экстремальное ухудшение качества воды (ЭУКВ)	Экстремальное изменение химического, биологического состава, физических свойств воды, делающее её непригодной для конкретных видов водопользования.

Примечание: *) – Термин полностью соответствует п. 29 ГОСТ 18457-73[2] «Устьевые области рек, впадающих в моря. Термины и определения».

Раздел 2 «Гидрографическая сеть морского устья реки» обхватывает широкий спектр определений (36 терминов и определений), касающихся сложной гидрографической сети морских устьев рек, состоящей из взаимосвязанных и взаимозависимых, природных и антропогенных водных объектов различного генезиса (водоёмов, водотоков, плавней, проливов, подземных вод, родников, ледников).

Основные геоморфологические элементы устья представлены в третьем разделе (10 терминов и определений). В предыдущем ГОСТ ГОСТ 18457–73[2] рассмотрено всего 4 термина (п. 19, 20, 29, 30), касающихся устьевого бара, косы бороздины и свала глубин, что было недостаточно для описания характерных для устьев рек форм рельефа. Поэтому раздел «Геоморфологические элементы морских устьев рек» расширен и отредактирован. Сохранено без изменений только определение подводной бороздины (п. 29 ГОСТ 18457–73[2]).

Четвертый раздел «Режим и гидрологическое районирование морских устьев рек», включает 40 терминов и определений, предлагаемых для описания основных характеристик режима морских устьев рек и районирования устьев на основе структурно-гидрологического анализа. Здесь предложена трактовка терминов, описывающих основные составляющие водного режима и отдельные участки устья, подверженные влиянию на них различных факторов.

Большой раздел, дающий толкование 45 терминов и определений, посвящен устьевым процессам и явлениям. Впервые систематизированы и отредактированы термины и определения, касающиеся ледовых явлений и процессов в морских устьях рек, поскольку их стандартизация в рамках ГОСТ 19179–73[3] недостаточна для характеристики ледового режима морских устьев рек. По сути, все устьевые процессы обусловлены взаимодействием реки и моря в определенной геологической среде. Они имеют важное значение в формировании и развитии устьев. Однако в предыдущем издании ГОСТ 18451–73–ГОСТ 18458–73[2] не приводится ни одного термина по этому направлению исследований. Термины и определения, представленные в пятом разделе, могут использоваться для описания гидрофизических, гидрохимических, гидрогеологических и комплексных опасных и особо опасных явлений, а также обменных, тепловых процессов, проникновения солёной воды (галоклина), перераспределения стока по рукавам, дельтообразования, фронтогенеза и других.

Заключение

Комплексность географического объекта – морского устья реки – потребовала междисциплинарного подхода для разработки и систематизации терминов и определений, характеризующих состояние и эволюцию устьев этого типа под действием природных и антропогенных факторов. Предлагаемая терминология предназначена для повышения качества научных разработок и удобства потребителей научной информации, так как из-за отсутствия ГОСТ «Морские устья рек» решение этих задач пока проблематично.

В отличие от применяемых в 70–80-х годах прошлого века ГОСТ «Океанология» и ГОСТ «Гидрология», не действующих в настоящее время, предлагаемый терминологический контент, существенно расширенный на основе синтеза знаний смежных наук, включает более широкий спектр терминов и определений, что приближает решение вопроса об их унификации и стандартизации, а также увеличивает возможности применения ГОСТ «Морские устья рек» в науке и практике.

В предлагаемой новой редакции терминов и определений ГОСТ «Морские устья рек» учтены современные знания, накопленные за последние 50 лет, и представления о специфических процессах и явлениях в морских устьях рек. Трактовка терминов более универсальна, так как охватывает типовое разнообразие морских устьев рек, независимо от их географического положения и методик определения параметров среды, которые со временем могут изменяться.

Разработанный вариант ГОСТ, включающий 147 терминов и определений, предназначен для широкого обсуждения в научном сообществе и, после утверждения в Техническом комитете по стандартизации, может использоваться в науке, технике и производстве.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственной темы FNNN-2021-0005 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем прибрежных зон Черного и Азовского морей» (шифр «Прибрежные исследования»).

Acknowledgements

The work was carried out within the framework of the state theme 0555-2021-0005 “Complex interdisciplinary studies of oceanological processes that determine the functioning and evolution of ecosystems of the coastal zones of the Black and Azov Seas” (code “Coastal research”).

Литература

Бурый А.С. Формирование терминосистем на основе онтологий // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. 2022. № 1(65). С. 4–11.

Гордеев В.В. Геохимия системы река – море. М.: ИП Матушкина И.И., 2012. 452 с.

Доронин Ю.П. Океанография шельфовой зоны. СПб.: Изд. РГГМУ, 2007. 128 с.

Иванов В.А., Миньковская Р.Я. Морские устья рек Украины и устьевые процессы: учебник для студ. высш. учеб. завед. Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2008. 806 с.

References

Buryj A.S. Formirovanie terminosistem na osnove ontologij [Formation of terminological systems based on ontologies] *Informacionno-ekonomicheskie aspekty standartizacii i tekhnicheskogo regulirovaniya [Information and economic aspects of standardization and technical regulation]*, 2022, no. 1(65), pp. 4–11. (In Russian; abstract in English).

Crane J.R., Solomon A.E. *Estuaries: types, movement patterns and climatical impacts*. New York, Nova Science Publishers, 2010. 329 p.

Chebotarev A.I. *Gidrologicheskij slovar' [Hydrological dictionary]* Leningrad, Hydrometeopubl, 1978. 308 p. (In Russian).

Doronin Yu.P *Okeanografiya shel'fovoj zony [Oceanography of the shelf zone]*. St. Petersburg,

Коротаев В.Н. Морфогенетическая классификация и районирование устьевых систем: геоморфологический аспект проблемы // Вестник Московского университета, 2012. Серия 5. География. № 6. С. 3–8.

Миньковская Р.Я. Термины и определения океанографии морских устьев рек: Методическое руководство. Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика». 2009. 28 с.

Миньковская Р.Я. Комплексные исследования разнотипных морских устьев рек (на примере морских устьев рек северо-западной части Черного моря). Севастополь: ИП Стрижак М.В., 2020. 364 с. DOI: 10.22449/978-5-6043409-2-9.

Михайлов В.Н. Гидрология устьев рек. М.: Изд. Москов. ун-та, 1998. 176 с.

Михайлов В.Н., Добровольский А.Д., Добролюбов С.А. Гидрология: учебник для студ. высш. учеб. завед. М.: «Высшая школа», 2005. 463 с.

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. DOI: 10.1134/S0097807812030050.

Михайлов В.Н., Михайлова М.В., Магрицкий Д.В. Основы гидрологии устьев рек. М.: Изд. «Триумф», 2018. 316 с.

Полонский В.Ф., Лупачёв Ю.В., Скриптунов Н.А. Гидролого-морфологические процессы в устьях рек и методы их расчёта. СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. 382 с.

Руководство по гидрологическому исследованию морских устьев рек / Под ред. С.С. Байдина. М.: Гидрометеоиздат, 1965. 340 с.

Самойлов И.В. Устья рек. М.: Географгиз, 1952. 528 с.

Скриптунов Н.А. Основные закономерности гидрологического режима неприливных устьевых взморьев // Труды Государственного океанографического института. 1978. Вып. 142. С. 25–33.

Чеботарёв А.И. Гидрологический словарь. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 308 с.

Publishing House of RSHU, 2007. 128 p. (In Russian; abstract in English).

Gordeev V.V. *Geohimiya sistemy reka – more [Geochemistry of the river – sea system]*. Moscow, Publ. IE Matushkina I.I., 2012. 452 p. (In Russian; abstract in English).

Ivanov V.A., Minkovskaya R.Ya. *Morskie ust'ya rek Ukrainy i ust'evye process [Sea estuaries of rivers of Ukraine and estuarine processes]*. Sevastopol. Publ. RPC "EKOSI-Hydrophysics", 2008. 806 p. (In Russian).

Korotaev V.N. Morfogeneticheskaya klassifikaciya i rajonirovanie ust'evyh sistem: geomorfologicheskij aspekt problemy [Morphogenetic classification and zoning of estuarine systems: geomorphological aspect of the problem] *Vestnik Moskovskogo universiteta [Bulletin of Moscow University. Series 5. Geography]*, 2012, no. 6, pp. 3–8. (In Russian; abstract in English).

Minkovskaya R.Ya. *Terminy i opredeleniya okeanografii morskih ust'ev rek: Metodicheskoe rukovodstvo [Terms and definitions of oceanography of sea estuaries of rivers. Methodical manual]* Sevastopol. Publ. RPC "EKOSI-Hydrophysics", 2009. 28 p. (In Russian).

Minkovskaya R.Ya. *Kompleksnye issledovaniya raznotipnyh morskih ust'ev rek (na primere morskih ust'ev rek severo-zapadnoj chasti Chernogo morya)[Complex studies of different types of sea estuaries of rivers (on the example of sea estuaries of rivers in the northwestern part of the Black Sea)]*. Sebastopol. Publ. IE Strizhak M.V., 2020. 364 p. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.22449/978-5-6043409-2-9.

Mikhailov V.N. *Gidrologiya ust'ev rek [Hydrology of river mouths]* Moscow, Publ. Moskow University Press, 1998. 176 p. (In Russian; abstract in English).

Mikhailov V.N., Dobrovolsky A.D., Dobrolyubov S.A. *Gidrologiya: uchebnik dlya stud. vyssh. ucheb. zaved. [* Hydrology. Textbook for students. higher. studies*]*. Moscow, Publ. Higher school, 2005. 463 p. (In Russian).

Mikhailov V.N., Gorin S.L. Novye opredeleniya, rajonirovanie i tipizaciya ust'evyh oblastej rek i ih chastej – estuariev [New definitions, regionalization

Щукин И.С. Общая геоморфология: в 3 т. Т. III. М.: Изд. Москов. ун-та, 1974. 383 с.

Crane J.R., Solomon A.E. Estuaries: types, movement patterns and climatical impacts. N.Y.: Nova Science Publishers, 2010. 329 p.

Officer Ch.B. Physical oceanography of estuaries (and associated coastal waters). N.Y.: Wiley-Interscience Publ., 1976. 465 p.

Prandle D. Estuaries: Dynamics, Mixing, Sedimentation and Morphology. N.Y.: Cambridge University Press, 2009. 248 p.

Pritchard D.W. What is an estuary: physical viewpoint // Estuaries. W.: Am. Ass. Adv. Sci., 1967. Publ. 83. P. 3–5.

and typification of river mouth areas and estuaries as their parts] *Wodnie resursi [Water resources]*, 2012, vol. 39, no. 3, pp. 243–257. DOI: 10.1134/S0097807812030050 (In Russian, in English).

Mikhailov V.N., Mikhailova M.V., Magritskiy D.V. *Osnovy gidrologii ust'ev rek* [*Fundamentals of hydrology of river mouths*]. Moscow, Publ. Triumph, 2018. 316 p. (In Russian).

Officer Ch.B. *Physical oceanography of estuaries (and associated coastal waters).* New York, Wiley-Interscience Publ., 1976. 465 p.

Polonsky V.F., Lupachev Yu.V., Skriptunov N.A. *Gidrologo-morfologicheskie processy v ust'yah rek i metody ih raschyota [Hydrological and morphological processes in river mouths and methods of their calculation]*. St. Petersburg, Hydrometeopubl, 1992. 382 p. (In Russian).

Prandle D. *Estuaries: Dynamics, Mixing, Sedimentation and Morphology*. New York, Publ., Cambridge University Press, 2009. 248 p.

Pritchard D.W. What is an estuary: physical viewpoint. *Estuaries*. Washington, Publ., Am. Ass. Adv. Sci., 1967, vol. 83, pp. 3–5.

Rukovodstvo po gidrologicheskomu issledovaniyu morskih ust'ev rek [Guide to the hydrological study of sea estuaries of rivers]. In Baidin S.S. (ed.). Moscow, Hydrometeopubl, 1965. 340 p. (In Russian).

Samoilov I.V. *Ust'ya rek [Estuaries of rivers*]. Moscow, Publ. Geografpubl, 1952. 528 p. (In Russian).

Shchukin I.S. *Obshchaya geomorfologiya [General geomorphology]* Moscow, Publ. Moscow University Press, 1974. vol. 3. 383 p. (In Russian).

Skriptunov N.A. Osnovnye zakonomernosti gidrologicheskogo rezhima neprilivnyh ust'evyh vzmor'ev [Basic regularities of the hydrological regime of non-tidal estuarine seashores] *Trudy Gosudarstvennogo okeanograficheskogo instituta. [Proceedings of the State Oceanographic Institute],* 1978, iss. 142, pp. 25–33. (In Russian).

УДК 551.468+006
DOI: 10.34753/HS.2023.5.1.108

РЕЦЕНЗИЯ НА СТАТЬЮ МИНЬКОВСКОЙ Р.Я. ПРЕДЛОЖЕНИЯ К ГОСТ «МОРСКИЕ УСТЬЯ РЕК»

С.В. Лебедева
Государственный гидрологический институт, г. Санкт-Петербург, Россия
hydrosima@gmail.com

REVIEW ON THE ARTICLE by R.Ya. Minkovskaya PROPOSALS TO THE STATE STANDARD "MARINE ESTUARIES"

Serafima V. Lebedeva
State Hydrological Institute, Saint-Petersburg, Russia
hydrosima@gmail.com

Тема, поднятая автором, очень актуальна. Нормативных документов, в которых были бы закреплены понятия, связанные с устьевыми областями рек, впадающих в моря, как отдельными географическими объектами, с их границами и статусом, действительно нет. Это затрудняет решение прикладных водохозяйственных задач, в том числе связанных с поддержанием их благоприятного экологического состояния, ведь природные ресурсы устьевых областей более уязвимы перед антропогенным воздействием по сравнению с реками и морской акваторией. Формализация и стандартизация представлений об устьевых областях рек действительно необходима.

В стремлении к стандартизации устьевой научной терминологии автор формулирует 147 определений в собственной оригинальной редакции. Определения относятся к терминам, описывающим не только структуру и границы, гидрографию и морфологию морской устьевой области, но и ледовые явления, а также некоторые общие гидрологические понятия, присущие как морским устьям, так и рекам, и морям. Такие общие понятия, как уровень воды, ледовые явления: ледоход, дрейф льда, закраина, разводье и т.д., в предложенном автором списке не везде оправданно отличаются от общепринятых. Например, ограничение размера закраины до 1 м, разводья до 50 м сильно не совпадает с практикой применения (в Росгидромете и другими организациями) этих терминов к ледовым явлениям на больших реках и в устьевых областях крупных рек, где разводья достигают длины в несколько ширин русла, а закраины на мелководьях – десятков метров. Некоторые общие термины (уровень воды, затор льда, зажор льда, навалы льда на берегах и др.), представленные в списке, не противоречат общепринятым или совпадают с определениями, данными в других известных источниках. Включение их в ГОСТ о морских устьях рек дискуссионно.

Между тем, есть понятия, которые действительно требуют большей однозначности, непротиворечивости и применимости при решении водохозяйственных задач именно в устьях рек. Основной проблемой является то, что устья рек не внесены ни в какие нормативы и стандарты как отдельные объекты водных отношений. Об этом пишет автор статьи в своих предыдущих работах [Миньковская, 2020]. Для того, чтобы их внести, необходимо однозначное определение и методика определения границ этого объекта.

Вместо понятия устьевая область реки автор использует термин морское устье реки (МУР), отказываясь от «области» и ограничивая рассматриваемые объекты только теми, у которых приемный водоем – море. При таком ограничении понятие «морское устье реки» действительно видится наиболее ёмким. И оно не противоречит общеизвестной концепции устьевой области. Критика формулировки определения из статьи [Михайлов, Горин, 2012, с. 245–246] по части синтаксиса, чрезмерной сложности и размытости используемых внутри определения понятий в рамках задачи

Lebedeva S.V. Review on the article by R.Y. Minkovskaya Proposals to the State Standard "Marine estuaries". *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2023, vol. 5, iss. 1, pp. 108–111. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2023.5.1.108.

стандартизации выглядит оправданной. Итоговое определение МУР не противоречит определению из работ [Михайлов, 1997; Михайлов, Горин, 2012] и при этом оставляет возможность проводить районирование внутри границ МУР по-разному. Дальше в списке, однако, следуют определения устьевого участка, дельты, устьевого взморья, которые дают представление о выбранном автором подходе к районированию. Выделение дельты и эстуария в отдельный район, не относящийся ни к взморью, ни к устьевому участку реки остается дискуссионным. Непонятно, почему именно дельта принципиально не может быть отнесена к устьевому участку реки, а эстуарий – к устьевому взморью, как это было принято в работе [Михайлов, 1997]. Принимая во внимание, что любое районирование, как и любая классификация природных объектов несет условный характер, стандартизировать то или иное пространственное деление устьевой области (морского устья реки) следует исходя из задач, на решение которых это стандартизированное районирование направлено, например, учитывая, как будет организовано водное хозяйство в устьях. Выделение дельты и эстуария в отдельный от взморья и устьевого участка район не дает возможности характеризовать их как акваторию с преобладающим влиянием реки или моря. Если устьевая область станет отдельным объектом водных отношений, то выделение районов внутри может и не понадобиться стандартизировать.

Границы морского устья реки, исходя из определения Р.Я. Миньковской, определяются дальностью распространения устьевых процессов и явлений, однако способы определения расположения этих границ не предложены. Вопрос о расположении границ этого географического объекта точно будет острой проблемой при решении водохозяйственных задач после «признания» морского устья реки как отдельного объекта водных отношений (отличного от реки и моря).

Определение устьевых процессов и явлений не приводится. К устьевым процессам и явлениям, согласно соответствующему разделу списка терминов, предлагается отнести сгонно-нагонные явления, припай, ледостав, сало, шугу, ледяные поля, сплоченность льда, подвижку люда, трещину, зажор льда и пр. пр. – явления, имеющие место и за пределами устьевой области. Должны ли они, по мнению автора, дублировать термины из будущих обновленных ГОСТов в сфере гидрологии суши и океанологии или должны по каким-то причинам отличаться? Это требует обсуждения. Остается непонятным, как должны быть определены границы устьевой области.

Михайлов В.Н. [1997] предлагает теоретически однозначное определение этих границ, которое трудно применимо на практике. Однако, оно дает точный ориентир при экспертной оценке и организации исследований. Верхнюю границу устья в этой работе предлагается выделять по предельной дальности распространения нагонов и, чтобы придать критериям такого выделения определенность, ограничить годовые максимальные величины нагонов 10% обеспеченностью, а меженные расходы воды – 90% обеспеченностью. Морская нижняя граница устья выделяется в этой работе по предельной дальности распространения зоны смешения, критерии при этом следующие: положение изогалины 90% обеспеченности солёности этого района моря при речном расходе половодья 10% обеспеченности. В условиях, когда определить таким образом границы на практике не представляется возможным, придется применять экспертный анализ и выбор границ с учетом предлагаемой методики. Именно методику определения границ устьевой области необходимо стандартизировать, что должно быть сделано в соответствии с условиями водного хозяйства, которые будут применяться в этих границах и за их пределами.

Важными для уточнения и стандартизации являются понятия: средний приливный расход воды, средний отливный расход воды, результирующий (речной) расход за приливо-отливный цикл. При использовании этих терминов в научных трудах и в прикладных работах и отчетах всегда требуются разъяснения. Неточность определения, данного в уже

недействующем нормативе «ГОСТ 18451–73 – ГОСТ 18458–73. Океанология», перекочевала в предлагаемый перечень понятий Миньковской Р.Я. В данной формулировке в условиях преобладания во время прилива обратных течений обе величины (средний приливный и средний отливный) будут положительными и в сумме дадут завышенный результирующий расход. В условиях отсутствия смены направления течения определение среднего отливного и среднего приливного расходов не однозначно и не требуется для расчета результирующего расхода, в то время как результирующий расход несет важный смысл.

Определения понятий геометрического места полных и малых вод (ГМПВ и ГММВ) в «ГОСТ 18451–73 – ГОСТ 18458–73. Океанология» предполагало, что ГМПВ и ГММВ в каждый новый прилив различно. Автор упрощает определение так, что становится непонятно, изменчиво ли это понятие от прилива к приливу и неясно, какие «любые» моменты наступления прилива и отлива следует учесть: в разные приливо-отливные циклы или в один. Поэтому это изменение в ранее сформулированное определение очень спорное.

В советское время организация научных исследований в морских устьях рек, а также изыскательские работы проводились структурой, включающей в себя устьевые станции, лабораторию морских устьев рек в ГОИН им. Н.Н. Зубова и соответствующее подразделение ААНИИ. В 1959 и 1965 гг. были проведены совещания, на которых присутствовали представители всех задействованных в устьевых исследованиях организаций, по итогам совещаний принимались важнейшие решения, отражавшиеся на организации научной и хозяйственной деятельности в устьях рек в дальнейшем. В следующий раз специалисты по устьям рек из разных регионов СССР собрались на секции «Устья рек» V Всесоюзного гидрологического съезда в 1986 г. Так же, как и мы сегодня, они говорили об уязвимости природных комплексов устьев рек и о хозяйственных проблемах, с ними связанных и остающихся без ответов. Доклады и протоколы дискуссий этих встреч опубликованы [Материалы…, 1959; Материалы …, 1965; Труды …, 1991].

Совещание-семинар в ГОИНе в 2011 г. было посвящено по большей части состоянию мониторинга в устьях рек, но мало или вообще не обсуждались вопросы организации водного хозяйства в устьях [Труды …, 2013].

Возможно, именно сегодня назрела необходимость обсуждения базовых понятий устьевой гидрологии, которые необходимо стандартизировать в связи с запросами водного хозяйства и в связи с антропогенным воздействием на устья, которое происходит в настоящее время. Миньковская Р.Я. пишет, что подробный анализ литературы и дискуссия по поводу предлагаемых определений к ГОСТу «Морские устья рек» изложен в её предыдущих работах. Перечень и содержание этих трудов выдает обширнейший опыт работы автора в научных и прикладных исследованиях морских устьев рек Севера Черноморского побережья. В обсуждение необходимо вовлечь специалистов, имеющих опыт исследований и решения прикладных задач, связанных с морскими устьями рек разного типа и размера, в разных климатических районах. Возможным результатом такого обсуждения (в рамках совещаний, семинаров, съездов или долговременной работы специальной комиссии) могла бы быть, например, методика определения границ устьевой области, которая бы применялась для определения границ каждого устья индивидуально в рамках специальных научно-прикладных работ с дальнейшим согласованием и закреплением этих границ юридически для каждого водного объекта. Это бы потребовало также определить новые нормативы для водного хозяйства в рамках устьевых областей: свои условия организации водоохранных зон и прибрежных полос, водосбросов и водозаборов в пределах устьевой области и т.д.

Литература

Материалы второго совещания специалистов устьевиков и семинара по исследованию гидрометеорологического режима морских устьев рек в ГОИНе (1-6 марта 1966 г.), Москва, 1966. 369 с.

Материалы первого совещания начальников устьевых гидрометеорологичеких станций и Лаборатории морских устьев рек ГОИНа (23 февраля – 4 марта 1959 г.). Москва, 1959. 295 с.

Миньковская, Р.Я. Комплексные исследования разнотипных морских устьев рек (на примере морских устьев рек северо-западной части Черного моря). [online] Севастополь, ФГБУН ФИЦ МГИ, 2020. 364 с.

Михайлов В.Н. Гидрологические процессы в устьях рек. М.: ГЕОС, 1997. 176 с.

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.

Труды V Всесоюзного гидрологического съезда. Том 9. Устья рек. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. 286 с.

Труды Государственного океанографического института, вып. 214, М., 2013

References

Materialy vtorogo soveshchaniya spetsialistov ust'yevikov i seminara po issledovaniyu gidrometeorologicheskogo rezhima morskikh ust'yev rek v GOINe (1-6 marta 1966 g.) [Materials of the second meeting of estuarine specialists and a seminar on the study of the hydrometeorological regime of sea estuaries in GOIN (March 1-6, 1966)]. Moscow, 1966. 369 p. (In Russian).

Materialy pervogo soveshchaniya nachal'nikov ust'yevykh gidrometeorologichekikh stantsiy i Laboratorii morskikh ust'yev rek GOINa (23 fevralya – 4 marta 1959 g.). [Materials of the first meeting of the heads of estuarine hydrometeorological stations and the Laboratory of Marine Estuaries of GOIN (February 23 - March 4, 1959)]. Moscow, 1959. 295 p. (In Russian).

Minkovskaya R.Ya. *Kompleksnyye issledovaniya raznotipnykh morskikh ust'yev rek (na primere morskikh ust'yev rek severo-zapadnoy chasti Chernogo morya) [Comprehensive studies of different types of sea river mouths (using the example of sea river mouths in the northwestern part of the Black Sea)]*. Sevastopol, FGBUN FITS MGI, 2020. 364 p. (In Russian).

Mikhaylov V.N. *Gidrologicheskiye protsessy v ust'yakh rek [Hydrological processes in river mouths]*. Moscow, GEOS, 1997. 176 p. (In Russian).

Mikhailov V.N., Gorin S.L. Novyye opredeleniya, rayonirovaniye i tipizatsiya ust'yevykh oblastey rek i ikh chastey – estuariyev [New definitions, zoning and typification of estuarine areas of rivers and their parts – estuaries]. *Water Resources*, 2012. Vol. 39. No. 3. P. 243–257. (In Russian).

Trudy V Vsesoyuznogo gidrologicheskogo s"yezda. Tom 9. Ust'ya rek. [Proceedings of the V All-Union Hydrological Congress. Volume 9. Mouths of rivers]. L.: Gidrometeoizdat, 1990. 286 p. (In Russian).

Trudy Gosudarstvennogo okeanograficheskogo instituta [Proceedings of the State Oceanographic Institute]. Moscow, 2013. Vol. 214.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

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

1. Фундаментальные проблемы гидросферы Земли
2. Опасные процессы в гидросфере: фундаментальные и инженерные аспекты
3. Экологические проблемы и опасности в гидросфере
4. Эволюция гидросферы
5. Методы, модели и технологии
6. Вопросы совершенствования нормативной документации
7. Мониторинговые, экспериментальные и экспедиционные исследования
8. Научные дискуссии
9. Наследие
10. Хроника

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

Общие требования к оформлению статьи:

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

Титульная страница должна содержать следующие элементы:

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

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

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

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

Единицы измерения по тексту статьи указываются в международной системе единиц.

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

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

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

В конце статьи могут быть приведены **Благодарности**, в котором следует упоминать людей, которые помогали при работе над статьей; источники финансирования.

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

Форматы оформления основных видов затекстовых библиографических ссылок:

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

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

Ссылки на статью в книге: *Фамилия И.О.* Заглавие статьи // Заглавие книги: Сведения, относящиеся к заглавию книги / Сведения об ответственности. Место издания (город): Издательство, год издания. Страницы статьи. DOI:

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

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

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

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

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

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

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

AUTHOR GUIDELINES

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

1. Fundamental problems of the Earth's hydrosphere
2. Hazardous processes in the hydrosphere: fundamental and engineering aspects
3. Ecological problems and hazards in the hydrosphere
4. The evolution of the hydrosphere
5. Methods, models and technologies
6. Issues of improving regulatory documentation
7. Monitoring, experimental and expeditionary research
8. Scientific discussions
9. Heritage
10. Chronicles

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

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

The general format requirements for articles to be published:

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

The title page should contain the following elements:

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

The main text.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Cite references in the text by last name and year in square brackets. If reference consist not more than three authors, you should place in text all author. If there are more than four authors - place in brackets the first author and words "et al." and not forget about year of publishing. If you need several reference cite in one place of text - please separate each reference by semicolons. If you use several references of one author in the same published year - you must separate it by letter near the year in reference list and in text.

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

Some formats for references list:

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

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

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

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

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

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

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

full names of author(s);

academic degree and title;

organization affiliation with full address (including Post Code);

position in organization;

contact telefon (for all authors);

contact e-mail (for all authors);

scientific indexes (scopus, orcid, web of science etc.).

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

Научное издание

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

Главный редактор: академик РАН Г.И. Долгих
Компьютерная верстка: О.Ю. Круковская
На обложке фото Н.А. Казакова
рисунки С.Шёстака, М.Зари
Подписано в печать 10.12.2023. Формат: 60x84/8
Бумага: офсетная. Печать плоская Усл. печ. л. 19,2. Тираж 50 экз. Заказ № ____
Выход в свет __.__.2023
Тип распространения: бесплатно на сайте журнала www.hydro-sphere.ru

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

Отпечатано с оригинал-макета заказчика в издательстве «Лема»
г. Санкт-Петербург, 1-я линия В.О., д. 28



«Морская бухта»



© 2023. «Гидросфера. Опасные процессы и явления». Все права защищены