

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ



THE RUSSIAN FEDERAL SERVICE
ON HYDROMETEOROLOGY
AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
АРКТИЧЕСКИЙ И АНТАРКТИЧЕСКИЙ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ



THE STATE SCIENTIFIC CENTER
OF THE RUSSIAN FEDERATION
THE ARCTIC AND ANTARCTIC
RESEARCH INSTITUTE

ПРОБЛЕМЫ АРКТИКИ И АНТАРКТИКИ

Problemy Arktiki i Antarktiki

Том 70, № 2, 2024

ARCTIC AND ANTARCTIC RESEARCH

Volume 70, No. 2, 2024

1834
190_{лет}
ГИДРОМЕТСЛУЖБЕ РОССИИ
2024

«Проблемы Арктики и Антарктики»

Научный рецензируемый журнал

Журнал продолжает основанное в 1937 г. периодическое издание «Проблемы Арктики».

Издается под научно-методическим руководством Отделения наук о Земле РАН

Научный рецензируемый журнал открытого доступа «Проблемы Арктики и Антарктики» публикует новые результаты исследований полярных областей Земли в области океанологии, метеорологии, климатологии, гидрологии, гляциологии, ледоведения, гидрохимии, палеогеографии, биологии и экологии полярных регионов, проблем экономической и социальной безопасности Арктики.

Главный редактор

Иванов В.В., д-р физ.-мат. наук, МГУ, Москва, Россия

Заместители главного редактора

Лейченко Г.Л., д-р геол.-мин. наук, ВНИИО, Санкт-Петербург, Россия

Липенков В.Я., канд. геогр. наук, ААНИИ, Санкт-Петербург, Россия

Репина И.А., д-р физ.-мат. наук, ИФА РАН, Москва, Россия

Редакционный совет

Председатель редакционного совета

Макаров А.С., д-р геогр. наук, ААНИИ, Санкт-Петербург, Россия

Члены редакционного совета

Каминский В.Д., академик РАН, ВНИИО, Санкт-Петербург, Россия

Котляков В.М., академик РАН, ИГ РАН, Москва, Россия

Магишов Г.Г., академик РАН, ЮНЦ, Ростов-на-Дону, Россия

Пугачев О.Н., академик РАН, ЗИН РАН, Санкт-Петербург, Россия

Румянцев В.А., академик РАН, ИНОЗ РАН, Санкт-Петербург, Россия

Тишков А.А., чл.-корр. РАН, ИГ РАН, Москва, Россия

Редакция

Ответственный секретарь

Алехина И.А., канд. биол. наук, ААНИИ, Санкт-Петербург, Россия

Литературный редактор

Миненко Е.В., Санкт-Петербург, Россия

Оригинал-макет и подготовка к печати

Меркулов А.А., ААНИИ, Санкт-Петербург, Россия

Редакционная коллегия

Алексеев Г.В., д-р геогр. наук, ААНИИ, Санкт-Петербург, Россия

Бобылев Л.П., канд. физ.-мат. наук, Нансен-центр, Санкт-Петербург, Россия

Вахтин Н.Б., чл.-корр. РАН, ЕУСПБ, Санкт-Петербург, Россия

Григорьев М.Н., д-р геогр. наук, ИМЗ СО РАН, Якутск, Россия

Денисенко С.Г., д-р биол. наук, ЗИН РАН, Санкт-Петербург, Россия

Дивин Д.В., д-р, NPI, Тромсё, Норвегия

Добролюбов С.А., академик РАН, МГУ, Москва, Россия

Дубинина Е.О., чл.-корр. РАН, ИГЕМ РАН, Москва, Россия

Катицов В.М., д-р физ.-мат. наук, ГГО, Санкт-Петербург, Россия

Козелов Б.В., д-р физ.-мат. наук, ПГИ, Мурманск, Россия

Лейбман М.О., д-р геол.-минерал. наук, ИКЗ СО РАН, Тюмень, Россия

Леппаранта М., проф., УН, Хельсинки, Финляндия

Логинов В.Ф., академик НАН ИП, НАНБ, Минск, Беларусь

Макшас А.П., д-р физ.-мат. наук, ААНИИ, Санкт-Петербург, Россия

Марченко А.В., проф., UNIS, Лонгйир, Норвегия

Миронов Е.У., д-р геогр. наук, ААНИИ, Санкт-Петербург, Россия

Околовцов Ю.Б., д-р биол. наук, UV, Веракрус, Мексика

Радионых В.Ф., канд. геогр. наук, ААНИИ, Санкт-Петербург, Россия

Райно Д., проф., IGE, Гренобль, Франция

Сазонов К.Е., д-р техн. наук, КГНЦ, Санкт-Петербург, Россия

Ставров К.Г., д-р техн. наук, НИОЦ АО «ГНИНГИ», Санкт-Петербург, Россия

Талалай П.Г., профессор, PRC JU, Чаньчунь, Китай

Тимохов Л.А., д-р физ.-мат. наук, ААНИИ, Санкт-Петербург, Россия

Трошников О.А., д-р физ.-мат. наук, ААНИИ, Санкт-Петербург, Россия

Филатов Н.Н., чл.-корр. РАН, ИВПС РАН, Петрозаводск, Россия

Флинт М.В., академик РАН, ИО РАН, Москва, Россия

Чистяков К.В., д-р геогр. наук, СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия

ISSN 0555-2648 (Print), ISSN 2618-6713 (Online)

Префикс DOI: 10.30758

Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий ВАК, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

Журнал публикует статьи по научным специальностям ВАК 1.6.1, 1.6.8, 1.6.14, 1.6.16, 1.6.17, 1.6.18.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций: свидетельство о регистрации печатного издания ПИ № ФС 77-73644 от 7 сентября 2018 г., свидетельство о регистрации сетевого издания ЭЛ № ФС 77-73287 от 20 июля 2018 г.

Адрес учредителя и издателя:

199397 Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38.

Тел. +7(812) 416-4251, e-mail: aaresearch@aaari.ru

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт.

Сайт журнала: <https://www.aaresearch.science>

Выходит ежеквартально. Подписной индекс издания в каталоге ООО «Урал-Пресс» 48657 (на полгода)

© ГНЦ РФ ААНИИ, 2024

© Росгидромет, 2024

Знаком информационной продукции не маркируется

Arctic and Antarctic Research

Scientific peer-reviewed journal

The journal continues the series of “Arctic Research”, founded in 1937.

The journal is published under the scientific and methodological guidance of the Earth Sciences Division of the Russian Academy of Sciences

Scientific peer-reviewed open access journal “Arctic and Antarctic Research” publishes new findings of studies of the Earth polar regions in oceanology, meteorology, climatology, hydrology, glaciology, hydrochemistry, paleogeography, biology and ecology of the polar regions, and on the problems of economic and social security in the Arctic.

Editor-in-Chief

Vladimir V. Ivanov, Dr. Sci. (Phys. and math.), MSU, Moscow, Russia

Deputy Editors-in-Chief

German L. Leitchenkov, Dr. Sci. (Geol. and mineral.), VNIIO, St. Petersburg, Russia

Vladimir Ya. Lipenkov, Cand. Sci. (Geography), AARI, St. Petersburg, Russia

Irina A. Repina, Dr. Sci. (Phys. and math.), IFA RAS, Moscow, Russia

Editorial Council

Chair

Alexander S. Makarov, Dr. Sci., AARI, St. Petersburg, Russia

Members

Valery D. Kaminsky, Academician, VNIIOA, St. Petersburg, Russia

Vladimir M. Kotlyakov, Academician, IG RAS, Moscow, Russia

Genady G. Matishov, Academician, SSC RAS, Rostov-on-Don, Russia

Oleg N. Pugachev, Academician, ZIN RAS, St. Petersburg, Russia

Vladislav A. Rumiantsev, Academician, ILS RAS, St. Petersburg, Russia

Arkady A. Tishkov, RAS Corr. member, IG RAS, Moscow, Russia

Editorial

Executive Secretary and Coordinator

Irina A. Alekhina, Cand. Sci., AARI, St. Petersburg, Russia

Literary Editor

Elena V. Minenko, St. Petersburg, Russia

Original layout and preparation for printing

Alexander A. Merkulov, AARI, St. Petersburg, Russia

Members of the editorial board

Genrikh V. Alekseev, Dr. Sci., AARI, St. Petersburg, Russia

Leonid P. Bobylev, Cand. Sci., NIERSC, St. Petersburg, Russia

Kirill V. Chistyakov, Dr. Sci., SPbU, St. Petersburg, Russia

Stanislav G. Denisenko, Dr. Sci., ZIN RAS, St. Petersburg, Russia

Dmitry V. Divine, Cand. Sci., NPI, Tromsø, Norway

Sergey A. Dobrolyubov, Academician, MSU, Moscow, Russia

Elena O. Dubinina, RAS Corr. member, IGEM RAS, Moscow, Russia

Nikolay N. Filatov, RAS Corr. member, NWPI, Petrozavodsk, Russia

Mikhail V. Flint, Academician, IO RAS, Moscow, Russia

Mikhail N. Grigoriev, Dr. Sci., MPI SB RAS, Yakutsk, Russia

Vladimir M. Kattsov, Dr. Sci., MGO, St. Petersburg, Russia

Boris V. Kozelov, Dr. Sci., PGI, Murmansk, Russia

Marina O. Leibman, Dr. Sci., ECI SB RAS, Tyumen, Russia

Matti Leppäranta, PhD, Prof. emer., UH, Helsinki, Finland

Vladimir F. Loginov, Academician, INM NASB, Minsk, Belarus

Alexander P. Makshtas, Dr. Sci., AARI, St. Petersburg, Russia

Alexey V. Marchenko, Dr. Sci., UNIS, Longyearbyen, Norway

Evgeny U. Mironov, Dr. Sci., AARI, St. Petersburg, Russia

Yury B. Okolodkov, Dr. Sci., UV, Veracruz, Mexico

Vladimir F. Radionov, Cand. Sci., AARI, St. Petersburg, Russia

Dominique Raynaud, Prof. emer., IGE, Grenoble, France

Kirill E. Sazonov, Dr. Sci., KSRC, St. Petersburg, Russia

Konstantin G. Stavrov, Dr. Sci., GNINGI, St. Petersburg, Russia

Pavel G. Talalay, Prof., Dr. Sci., PRC YU, Changchun, PRC

Leonid A. Timokhov, Dr. Sci., AARI, St. Petersburg, Russia

Oleg A. Troshichev, Dr. Sci., AARI, St. Petersburg, Russia

Nikolay B. Vakhtin, RAS Corr. member, EUSP, St. Petersburg, Russia

ISSN 0555-2648 (Print), ISSN 2618-6713 (Online)

DOI-prefix: 10.30758

The Journal is licenced and indexed by the Supreme Certification Commission in Moscow (VAK).

The Journal publishes papers on the next scientific specialties of the Supreme Certification Commission:

1.6.1, 1.6.8, 1.6.14, 1.6.16, 1.6.17, 1.6.18.

Issued by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media:

Registration Certificate for the print publishing ПИ № ФЦ 77-73644 of September 7, 2018.

Registration Certificate for the web publishing ЭЛ № ФЦ 77-73287 of July 20, 2018.

Contacts:

199397 Saint Petersburg, Bering str, 38; phone: +7 (812) 416-4251; e-mail: aaresearch@aari.ru.

State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute

<https://www.aaresearch.science>

Four issues per year. Subscription index of the journal catalog “Ural-Press” 48657 (for half a year)

© SSC RF AARI, 2024

© Roshydromet, 2024

The Journal is not marked with the Information Product label

Содержание

ОКЕАНОЛОГИЯ

Характеристики неблагоприятных уровней воды относительно критических значений по наблюдениям на стационарных постах в Обской и Тазовской губах	144
<i>А.А. Пискун</i>	

МЕТЕОРОЛОГИЯ И КЛИМАТОЛОГИЯ

Некоторые механизмы формирования аномальной температуры воздуха в летние сезоны на арх. Шпицберген.....	161
<i>И.А. Ильющенко, А.Я. Коржилов, Б.В. Иванов</i>	

ГИДРОЛОГИЯ СУШИ И ГИДРОХИМИЯ

Использование теории ландшафтоведения для оценки распространения различных типов речных русел на территории Арктической зоны Российской Федерации	174
<i>А.И. Баскакова</i>	

Гидрологические опасности в устье Печоры	185
<i>Д.В. Магрицкий, С.А. Агафонова, Л.С. Банищикова, К.И. Головнин, Л.Ю. Севастьянова, А.Э. Сумачев</i>	

Концептуальные и методологические подходы к организации системы контроля поверхностных вод Арктической зоны Российской Федерации	210
<i>В.А. Румянцев</i>	

ГЛЯЦИОЛОГИЯ И КРИОЛОГИЯ

Факторы активизации термоденудации и активность термоцирков на Центральном Ямале в 2010–2018 гг.	222
<i>А.В. Хомутов, Е.А. Бабкина, Р.Р. Хайруллин, Ю.А. Дворников</i>	

Критерии айсберговой опасности в морях Арктической зоны Российской Федерации	238
<i>И.А. Бычкова, К.Г. Кортикова, В.Г. Смирнов</i>	

СТРАНИЦЫ ИСТОРИИ

Изучение физических свойств льда в России и СССР (конец XIX в. — 1940 г.). Упругость и вязкость льда	253
<i>К.Е. Сазонов</i>	

Contents

OCEANOLOGY

- Characteristics of unfavorable levels relative to critical values
as observed at stationary posts in the Ob and Taz bays 144
A.A. Piskun

METEOROLOGY AND CLIMATOLOGY

- Some mechanisms of abnormal surface air temperature formation
in the area of the Spitsbergen archipelago in summer 161
I.A. Ilyushchenkova, A.Ya. Korzhikov, B.V. Ivanov

HYDROLOGY OF LAND AND HYDROCHEMISTRY

- Using the theory of landscape studies to assess the distribution of different types
of riverbeds in the Arctic zone 174
A.I. Baskakova
- Hydrological hazards at the mouth of the Pechora River 185
*D.V. Magritsky, S.A. Agafonova, L.S. Banshchikova, K.I. Golovnin,
L.Yu. Sevastyanova, A.E. Sumachev*
- Conceptual and methodological approaches to the organisation of a signal system
for controlling the ecological state of surface fresh waters in the territory
of the Arctic zone of the Russian Federation 210
V.A. Rumyantsev

GLACIOLOGY AND CRYOLOGY OF THE EARTH

- Factors of thermal denudation activation and thermicirques activity
on central Yamal in 2010–2018 222
A.V. Khomutov, E.A. Babkina, R.R. Khairullin, Yu.A. Dvornikov
- Criteria of iceberg hazard in the seas of the Russian Federation Arctic zone 238
I.A. Bychkova, K.G. Kortikova, V.G. Smirnov

PAGES OF HISTORY

- Studies of ice physical properties in Russia and USSR (late XIXth century — 1940).
Ice elasticity and viscosity 253
K.E. Sazonov

ОКЕАНОЛОГИЯ OCEANOLOGY

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-2-144-160>

УДК 556. 542 (282.256.26+282.256.17)



Характеристики неблагоприятных уровней воды относительно критических значений по наблюдениям на стационарных постах в Обской и Тазовской губах

А.А. Пискун✉

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,
Санкт-Петербург, Россия

✉piskun@aari.ru

Аннотация. Уровни воды, выходящие за пределы критических значений, представляют опасность для хозяйственных объектов, расположенных на прилегающей территории. Цель работы — на основе материалов Водного кадастра получить наиболее общие характеристики неблагоприятных уровней воды относительно критических значений, установленных решением УГМС, по наблюдениям на стационарных постах Обской и Тазовской губ. К этим постам относятся Новый Порт, м. Каменный, Тадибеяха, Сеяха, Тамбей, 60 лет ВЛКСМ, Антипаюта. Источники исходных данных — гидрологические ежегодники по бассейну Карского моря за период 1953–2019 гг. Сформированы однородные в высотном отношении ряды уровней, значения которых выше или ниже критических отметок. Впервые получены статистические характеристики экстремальных уровней, выходящих за рамки критических значений. Результаты могут быть использованы при оценке рисков в зависимости от высотного местоположения проектируемого сооружения. Они позволяют учесть возможное неблагоприятное воздействие экстремальных уровней на эти сооружения.

Ключевые слова: гидрологические ежегодники, критические отметки, однородные ряды, статистические характеристики, экстремальные уровни

Для цитирования: Пискун А.А. Характеристики неблагоприятных уровней воды относительно критических значений по наблюдениям на стационарных постах в Обской и Тазовской губах. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2024;70(2):144–160. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-2-144-160>

Поступила 28.03.2024

После переработки 05.06.2024

Принята 07.06.2024

Characteristics of unfavorable levels relative to critical values as observed at stationary posts in the Ob and Taz bays

Aleksandr A. Piskun✉

State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

✉piskun@aari.ru

Abstract. Water levels exceeding critical values pose a danger to economic facilities located in the adjacent territory. The aim of the work is to obtain, using the materials of the Water Cadastre, the most general characteristics of unfavorable water levels relative to the critical values established by the decision of the UGMS, based on observations at stationary posts in the Ob and Taz Bays. These posts include New Port, Cape Kamenny, Tadibeyakha, Seyakha, Tambey, 60 Let VLKSM, Antipayuta. No generalizations on this issue are found in the research literature for the area under consideration. Sources of initial data are hydrological yearbooks for the Kara Sea basin for the period 1953–2019. The generated series of levels for each post are brought to a single reference plane for the observation period. The length of the rows ranges from 14 to 61 values. As a result of data analysis, the following characteristics of unfavorable levels were obtained: the proportion of years with extreme levels above the critical level during surges and floods and below the critical levels during surges; distribution by month of the largest exceedances of levels above and below the critical ones during the year; the maximum values of exceedances and duration of levels above and below the critical ones; repeatability of values of extreme annual elevations/decreases in level relative to the critical ones at given intervals; information on the maximum number and duration of repeated cases of unfavorable levels at the post per year and the total duration for the entire period. It has been established that among the posts that have a series of observations of levels over 20 years, the most unfavorable conditions in terms of levels are formed for the Tadibeyakha and Antipayuta posts in all indicators. The results obtained can be used in risk assessment depending on the high-altitude location of a structure being designed. They take into account the possible adverse effects of extreme levels on these structures.

Keywords: critical marks, extreme levels, homogeneous series, hydrological yearbooks, statistical characteristics

For citation: Piskun A.A. Characteristics of unfavorable levels relative to critical values as observed at stationary posts in the Ob and Taz bays. *Arctic and Antarctic Research*. 2024;70(2):144–160. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-2-144-160>

Received 28.03.2024

Revised 05.06.2024

Accepted 07.06.2024

Введение

Одной из основных задач в сфере развития науки и технологий в интересах развития Арктики является расширение деятельности по проведению исследований опасных природных и природно-техногенных явлений в Арктике. Это отмечено в документе «Основы государственной политики РФ в Арктике на период до 2035 года» (утверждены Указом Президента РФ от 5 марта 2020 г. № 164).

Одним из элементов гидрологического режима и процессов, которые при определенных условиях могут вызывать негативные последствия для хозяйственной деятельности, является уровень воды. К неблагоприятным либо опасным гидрологическим явлениям относятся такие уровни воды, значения которых лежат выше или ниже критических отметок^{1, 2}. В общем случае выход уровней за пределы критиче-

¹ РД 52.04.563–2002. *Руководящий документ. Инструкция по подготовке и передаче штурмовых сообщений наблюдательными подразделениями*. СПб., 2013. 49 с.

² РД 52.10.842–2017. *Наставление гидрометеорологическим станциям и постам*. Выпуск 9. Гидрометеорологические наблюдения на морских станциях и постах. Часть I. Гидрологические наблюдения на береговых станциях и постах. М.: Изд-во ИТРК, 2017. 375 с.

ских значений может привести к затоплению береговых сооружений и населенных пунктов, повреждению судов и различных хозяйственных объектов, прекращению судоходства, осушке водозаборных сооружений, что может принести существенный материальный ущерб.

Значения максимальных критических уровней ($H_{кр\ макс}$) и минимальных ($H_{кр\ мин}$) для каждого поста устанавливаются решением УГМС, принятым с учетом требований заинтересованных организаций.

Колебания уровня воды в Обской и Тазовской губах определяются влиянием совокупности факторов, основными из которых являются периодические (приливы/отливы), непериодические (сгоны/нагоны) и речной сток. В силу большой пространственной протяженности губ (Обская — около 800 км, Тазовская — 300 км [1]) вклад этих факторов в формирование суммарного уровня в разных районах их акватории существенно различается. Например, в южной части Обской губы экстремально высокие уровни обусловлены анемобарическими причинами [2], в северной части преобладает влияние периодических факторов [1, 2 и др.]. Колебания уровня, вызванные периодическими и непериодическими явлениями, происходят относительно фона водной поверхности в губе, сформированного речным стоком в сочетании с высотным положением уровня Карского моря. Исследования В.Г. Корта позволили прийти к выводу об отсутствии сейшевых колебаний уровня в губе [2].

Сгонно-нагонные колебания уровня в Обской губе формируются под влиянием барических образований, центр которых расположен либо к востоку от губы (циклоны, вызывающие нагонные ветры северной четверти), либо к западу (антициклоны, вызывающие сгонные ветры южной четверти) [2].

Как отмечает А.В. Коптева [3], устойчивые ветры северной четверти в районе Обской губы и прилегающей южной части Карского моря вызывают подъем уровня и нагонные течения, направленные на юг, а устойчивые ветры южной четверти — падение уровня и сгонные течения, направленные на север. Западные и восточные ветры заметного влияния на экстремальные уровни и течения в Обской губе не оказывают. Для Тазовской губы нагонными являются ветры западной четверти, сгонными — восточной.

Результаты анализа сгонно-нагонных колебаний уровня воды в Обской и Тазовской губах приведены в ряде работ [2, 4–7] на основе ежедневных и 4-срочных наблюдений на стационарных и экспедиционных постах. Наибольшую ценность для исследования колебаний уровня представляют материалы ежедневных наблюдений, но они сравнительно немногочисленны, относятся к непубликуемой части Водного кадастра и имеют ограниченное распространение, поскольку хранятся в фондовых архивах.

Понятно, что для временных экспедиционных постов ряды наблюдений слишком коротки для назначения критических отметок и, вероятно, в этом не было потребности. В связи с этим в отмеченных работах для сравнимости характеристик колебаний уровня на разных постах (временных и стационарных) использовался единый методический подход, который предложил В.Г. Корт [2]. Его суть в том, что экстремальные нагонные и сгонные уровни выбирались относительно значений заданной обеспеченности 5 и 95 % соответственно. При этом в работах [4–7] анализ сгонов и нагонов выполнялся по остаточным рядам (суммарный уровень минус приливная составляющая), полученным из срочных наблюдений, приведенных к однородному виду в высотном отношении.

Основная цель данной работы — на основе материалов, представленных в публикуемой части Водного кадастра^{3, 4, 5, 6}, получить наиболее общие характеристики неблагоприятных уровней воды относительно критических значений $H_{кр\ макс}$ и $H_{кр\ мин}$, установленных решением УГМС, по наблюдениям на стационарных постах Обской и Тазовской губ.

Материалы наблюдений, их обработка и анализ

Исходными данными получения характеристик уровней, значения которых выше или ниже критических, послужили экстремальные месячные и годовые уровни, сведения о сгонах и нагонах на стационарных постах Обской и Тазовской губ по данным публикуемой части Водного кадастра РФ (табл. 1), а также сведения о критических значениях уровня для этих постов (табл. 2). В изданиях Водного кадастра, указанных выше, значения критических уровней приведены для постов Обской губы — Новый Порт, Каменный, Сеяха, Тадибейха, Тамбей, им. 60-летия ВЛКСМ — и Тазовской — Антипаюта.

Таблица 1

Периоды, за которые выполнена выборка данных для анализа критических уровней на постах Обской и Тазовской губ

Table 1

Periods for which the data were sampled for the analysis of critical levels at the posts of the Ob and Taz bays

Пост	Период выборки экстремальных годовых уровней по таблицам «Уровень воды», приведенным в ГЕ*, ЕДС** и ЕДМ****	Период выборки из таблиц 1.1.4 «Нагоны и сгоны», приведенных в ЕДМ*** том 4 часть 1	Период выборки из таблиц 2.1.4 «Неблагоприятные гидрологические явления», приведенных в ЕДМ**** том 4 часть 2
Новый Порт	1955–2012, 2015, 2017–2019	1985–2019	1990–2019
Каменный	1977–1993	1983–1989	—
Сеяха	1967–1993, 2000–2019	1981–1989	1990–1993, 2000–2019
Тадибейха	1953–1993	1977–1992	—
Тамбей	1976–1992	1978–1992	—
60 лет ВЛКСМ	1979–1992	1979–1992	1979–1992
Антипаюта	1971–1996, 2001–2017	1977–1987	1988–1996, 2003–2017

Примечание. ГЕ — Гидрологический ежегодник; ЕДС — Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши; ЕДМ — Ежегодные данные о режиме и качестве вод морей и морских устьев рек; * — см. сноску 3; ** — см. сноску 4; *** — см. сноску 6; **** — см. сноску 5.

Note. GE — Hydrological Yearbook; EDS — Annual data on the regime and resources of surface waters on land; EDM — Annual data on the regime and quality of waters of the seas and estuaries; * — see footnote 3; ** — see footnote 4; *** — see footnote 6; **** — see footnote 5.

³ Гидрологический ежегодник. Том 6. Бассейн Карского моря (западная часть). Выпуск 0–9, 1936–1955 гг.; Выпуск 4–9, 1956–1965 гг.; Выпуск 4–6, 8, 9. 1966–1977 гг.

⁴ Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и качестве вод морей и морских устьев рек. Том 7. Выпуск. 1. Часть 2. 1977–1983 гг.

⁵ Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и качестве вод морей и морских устьев рек. Том 4. Часть 1. Карское море. 1977–2018 гг.

⁶ Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и качестве вод морей и морских устьев рек. Том 4. Часть 2. Карское море. Морские устья рек. 1977–2018 гг.

Таблица 2

Сведения о критических уровнях ($H_{кр}$) на постах Обской и Тазовской губ по данным ЕДМ и уточненные с учетом поправок

Table 2

Information on critical levels ($H_{кр}$) at the posts of the Ob and Tazovskaya bays according to EDM data and updated based on corrections

Пост	По данным ЕДМ Том 6, Том 7 и Том 4 часть 2			В системе единого нуля поста (ЕНП)	
	Критические уровни		Год назначения $H_{кр}$	$H_{кр\ макс}$	$H_{кр\ мин}$
	$H_{кр\ макс}$	$H_{кр\ мин}$			
Новый Порт	565	350	1981	569*	354*
	568	353	1985		
Каменный	540	350	1982	551*	361*
Сеяха	589	376	1981	589	376
	230	нет сведений	2000		
	289	76	2004		
Тадибеяха	624	436	1977	581*	437*
	580	436	1982		
Тамбей	570	340	1982	570	340
60 лет ВЛКСМ	530	320	1979	530	320
Антипаюта	250	47	1977	624	421
	624	421	1978		
	324	121	1994		

Примечание. $H_{кр\ макс}$, $H_{кр\ мин}$ — максимальные и минимальные критические уровни соответственно; * — приведены к единой плоскости отсчета для данного поста с учетом поправок [4].

Note. $H_{кр\ макс}$, $H_{кр\ мин}$ — maximum and minimum critical levels, respectively; * — reduced to a single reference plane for a given post, based on corrections [4].

Поясним, что в ежегодниках Том 6, Том 7 и Том 4 часть 2 в таблицах «Уровень» приводятся среднесуточные значения, а также экстремальные за каждый месяц уровни (из срочных значений). Из них итоговой строкой выбраны экстремальные годовые уровни. Годовые экстремумы могут проявляться как в период открытого русла, так и при ледовых явлениях. Приводится одно значение высшего за год уровня. Что касается низшего уровня, то по 1970 г. их значения в ежегодниках помещались за текущий календарный год. Затем правило изменилось — низший уровень стали представлять отдельно для периода открытого русла и для зимнего периода. При этом выборки низшего зимнего уровня приурочили к гидрологическому году. Для Обской и Тазовской губ рамки гидрологического года определяются по ледовым фазам — от даты начала осенних ледовых явлений до очищения акватории ото льда в следующем календарном году.

Напомним, что ЕДМ издаются начиная с 1976 г. С 1984 г. введена в действие новая номенклатура изданий государственного водного кадастра (ГВК) по морям и морским устьям рек, которые по бассейну Карского моря издаются в Томе 4 и состоят из двух частей: часть 1 «Карское море» и часть 2 «Морские устья рек». Обе части издаются раздельно^{5,6}.

Метод исследования, примененный в настоящей работе, складывается из таких этапов, как сбор данных об экстремальных уровнях, опубликованных в ежегодниках, и формирование массивов в формате Excel; анализ качества данных и приведение уровней к однородному виду в высотном отношении; определение характеристик

уровня выше максимальных критических значений ($H_{кр\ макс}$) и ниже минимальных критических значений ($H_{кр\ мин}$) для каждого поста; расчет статистических характеристик.

Анализ данных, представленных в ЕДМ, показал, что уровни требуют приведения к однородному виду в высотном отношении по причинам, которые неоднократно освещались в предшествующих публикациях [4–7]. Необходимость введения поправок относится и к критическим уровням табл. 2. Такие поправки к $H_{кр}$ составили: для поста Каменный +11 см, Тадибеяха +1 см, Новый Порт +4 см за период до конца 1984 г. включительно и +1 см с 1 января 1985 г.

Для нас важно отметить, что для получения *превышения* наблюдаемого уровня над $H_{кр}$, как с поправкой, так и без нее, результат будет одинаков при условии, что уровни за весь год представлены в одной системе над нулем поста. Тогда как при работе непосредственно с уровнями, а не с их превышениями над критическими следует вводить поправку в значения $H_{кр}$ такую же, как и в сами уровни.

Известно [4], что качество данных об уровнях воды серьезно снижается из-за пропусков в наблюдениях, которые нередко обусловлены выходом уровня за пределы критических значений при резких его колебаниях. При этом теряется самая важная информация об их экстремальных проявлениях и нарушается непрерывность рядов данных. Наиболее часто пропуски в наблюдениях отмечаются на посту Тамбей (из 18 лет наблюдений только 4 года без перерывов).

Отдельно следует отметить неудовлетворительное качество наблюдений на постах Сеяха и Антипаюта. В Сеяхе наблюдения над уровнем, которые выполнялись по морской программе (ежечасные и 4-срочные), были прерваны в 1994 г. и возобновлены в 2000 г. по программе речного поста (2-срочные). В Антипаюте переход к 2-срочным наблюдениям произошел с 1 апреля 1988 г., в 1996 г. наблюдения были прерваны, возобновлены в 2001 г. и продолжают по речной программе. Для охвата экстремальных сгонов и нагонов 2-срочные наблюдения в Обской и Тазовской губах полностью не информативны.

Данные наблюдений показывают, что в Антипаюте, в отличие от других рассматриваемых постов, экстремально высокие годовые уровни приурочены не к нагонам, а к весеннему половодью, которое ежегодно имеет четко выраженный характер, что видно на примере 1987 г. (рис. 1). Действующими наставлениями предусмотрены учащенные наблюдения в этот период, что обеспечивает фиксацию экстремального уровня половодья. Однако после прохождения половодной волны возобновляются 2-срочные наблюдения, которые не позволяют получить точную информацию об экстремальных сгонно-нагонных уровнях.

В отличие от Антипаюта на постах Обской губы экстремально высокие уровни не привязаны к фазе весеннего половодья и могут наблюдаться в любое время, предугадать которое заранее и организовать учащенные наблюдения невозможно. В этих условиях наблюдения за уровнем должны вестись непрерывно с помощью самописца, что неоднократно отмечалось в предыдущих работах [4–7].

Особая ситуация с уровнями, включая критические отметки, представленными в ежегодных изданиях Водного кадастра, сложились для поста Сеяха. На этом посту с 2000 г. критические отметки несколько раз менялись, но какие-либо комментарии в ежегодниках о причинах этих изменений отсутствуют. Также начиная с 2000 г. неоднократно менялся нуль поста (2001–2006, 2012, 2014 гг. — условная система высот; 2000, 2007, 2008 гг. — система БС (Балтийская); 2009–2011, 2013, 2015–2019 — БС-77).

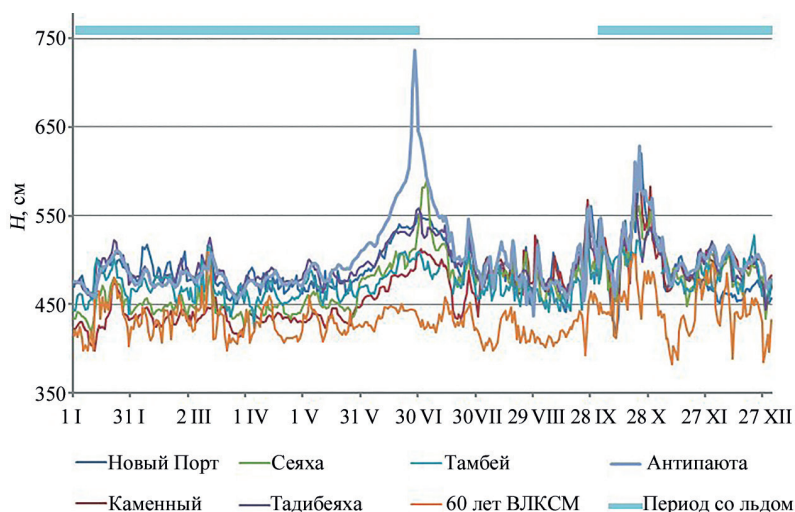


Рис. 1. Внутригодовая изменчивость среднесуточных уровней воды на постах в 1987 г.

Fig. 1. Intra-annual variability of average daily water levels at stations in 1987

Выполнено сравнение характеристик уровня воды, вычисленных для ежечасных, 4-срочных и 2-срочных наблюдений на постах Обской и Тазовской губ. Оно показало, что наибольшие расхождения между ежечасными и 4-срочными наблюдениями при определении экстремальных уровней достигают 32–78 см. Наибольшие расхождения между ежечасными и 2-срочными данными при определении экстремальных уровней составляют 60–177 см [8]. Таким образом, сокращение сроков наблюдений за уровнем воды приводит к потере информации, необходимой для расчета уровня воды редкой повторяемости и в итоге к заведомо неадекватным выводам о повторяемости явления. Например, исходя из ряда 2-срочных наблюдений, мы находим обеспеченность нагонного уровня путем экстраполяции по теоретической кривой, тогда как такой уровень уже случался между сроками, но не был зафиксирован.

В табл. 3 помещены сведения о наличии и количестве значений экстремальных годовых и месячных уровней, а также значений продолжительности сгонов и нагонов, выбранных из изданий ВК по всем рядам за периоды, указанные в табл. 1.

Из табл. 3 видно, что продолжительность рядов экстремальных годовых и месячных уровней по большинству постов позволяет получить статистические характеристики. Тогда как длина рядов из таблиц сгонов и нагонов ЕДМ часть 1⁵ и часть 2⁶, содержащих сведения о продолжительности стояния неблагоприятных уровней *при всех сгонах/нагонах, зафиксированных за год*, оказалась явно недостаточной для таких целей.

Уточним, что таблица 2.1.4 «Неблагоприятные гидрологические явления» включена в ЕДМ часть 2 «Морские устья»⁶ начиная с 1990 г. Она предусматривает наличие информации о превышениях и продолжительности стояния уровня относительно среднемесячных значений при сгонах и нагонах. В ней приводится также информация об экстремальных уровнях при других неблагоприятных проявлениях уровня, имеющих место на устьевых участках рек, а именно — при паводках, в межень и при зажорах. Графа «продолжительность» в данной таблице предусмотрена (также в часах), но, к сожалению, она чаще всего не заполнена из-за отсутствия ежечасных наблюдений.

Таблица 3

Выборки лет со случаями стояния уровня выше $H_{кр\ макс}$ и ниже $H_{кр\ мин}$

Table 3

Selections of years with levels above $H_{кр\ макс}$ and below $H_{кр\ мин}$

Пост	Число лет, из которых выбирались экстремумы	Число лет со случаями стояния уровня выше $H_{кр\ макс}$ и ниже $H_{кр\ мин}$			
		По выборкам для величины экстремальных годовых и месячных уровней**		По выборкам для продолжительности нагонов/сгонов***	
		для нагонов	для сгонов	для нагонов	для сгонов
Новый Порт	61	37	5	11	4
Каменный	17	15	0	6	0
Сеяха	47	21	11	9	3
Тадибеяха	40	32	37	5	12
Тамбей	18	3	1	1	0
60 лет ВЛКСМ	14	9	4	4	1
Антипаяута*	40/43	40	38	26	25

Примечание. * — по посту Антипаяута все случаи превышения уровня относительно критических отметок приурочены к весеннему половодью. Число лет, из которых выбирались экстремумы, по Антипаяуте приведены в виде дроби в двух вариантах с разницей 3 года из-за того, что в 2001 г. наблюдения в период половодья отсутствуют, за 2002, 2003 гг. данные за период половодья забракованы. Выборки для сгонов выполнены по календарным годам; ** — данные взяты из табл. «Уровень» ГЕ, ЕДС, ЕДМ часть 2; *** — данные взяты из табл. 1.1.4 ЕДМ «Карское море» и 2.1.4 «Морские устья».

Note. * — according to the Antipayut post, all the levels exceeding the critical ones are confined to the spring flood. The number of years from which the extremes were selected, according to Antipayuta, are given in the form of a fraction in two versions with a difference of 3 years due to the fact that in 2001 there were no observations during the flood period; for 2002 and 2003, the data for the flood period were rejected. Samples for the surges were made by the calendar year; ** — the data are taken from the table. “Level” GE, EDS, EDM part 2; *** — the data are taken from Tables 1.1.4 of the EDM “Kara Sea” and 2.1.4 “Sea mouths”.

Явный недостаток данных, представленных в таблице 2.1.4 ЕДМ часть 2, состоит в том, что превышения наблюдаемого экстремального уровня предусмотрено представлять относительно среднемесячного значения, а не от $H_{кр}$. В результате чего получаем неоднородный ряд (даже для одного года, если сгонов/нагонов было несколько и проявлялись они в разные месяцы), поскольку даны относительно среднемесячных значений, т. е. переменной величины. В случае, если пик явления отмечается на стыке двух месяцев, возникает неопределенность — какому месяцу отдать предпочтение при выборе среднего. При этом среднемесячные уровни в данной таблице не представлены; за ними приходится обращаться к другой таблице этого ежегодника, а именно, к таблице «Уровень». Как показала практика, превышения целесообразно давать относительно постоянного значения — критических уровней. Это учтено в данной работе.

Добавим, что таблицы «Уровень» ГЕ, ЕДС и ЕДМ часть 2, включающие экстремальные годовые и месячные уровни, не содержат информации о продолжительности явления, отмечаются только даты их наблюдения с точностью до суток. Тогда как в таблицах 1.1.4 и 2.1.4 из ЕДМ том 4 часть 1⁵ и часть 2⁶ предусмотрено для каждого нагона/сгона (а не только для экстремального за год или месяц) включение информации о величине его максимального превышения/понижения и продолжительности стояния уровня выше/ниже критических значений в часах. При этом

с момента перевода наблюдений в Антипаюте и Сеяхе на речную программу стало невозможно точно определить предусмотренную таблицей 2.1.4 ЕДМ продолжительность явления в часах. Вместо этого в ней приводится только даты, зачастую и сроки, в которые явление наблюдалось. В таких случаях иногда дается условная продолжительность — наблюдение в один срок приравнивается к 6 часам.

Таким образом, в зависимости от наличия исходных данных (табл. 3), представленных в соответствующих таблицах ежегодников ВК, мы можем получить такие характеристики экстремальных уровней, как *превышение* над критическим уровнем (для всего периода наблюдений) и *продолжительность* стояния выше и ниже критических отметок (для отдельных лет, обеспеченных соответствующими наблюдениями).

Результаты и обсуждение

На основе приведенных в табл. 1 рядов данных получены расчетные характеристики экстремальных уровней, лежащих выше или ниже критических значений, представленных в табл. 2.

Вначале остановимся на результатах обработки экстремальных годовых уровней, полученных из таблиц «Уровень воды», представленных в изданиях ГЕ³, ЕДС⁴ и ЕДМ⁶. В табл. 4 помещены данные о количестве лет с экстремальным уровнем выше и ниже критических значений и их соотношении с общим числом лет наблюдений на посту.

Таблица 4

Число лет с превышениями экстремальных годовых уровней относительно критических значений (по данным таблиц «Уровни воды»)

Table 4

Number of years with extreme annual levels exceeding the critical values (according to the “Water Levels” tables)

Характеристика	Новый Порт	Каменный	Сеяха	Талибеяха	Тамбей	60 лет ВЛКСМ	Антипаюта (половодья)	Антипаюта (сгоны)
Число лет наблюдений	61	17	47	40	18	14	40*	43
Число лет с экстремальным уровнем выше $H_{кр макс}$	37	15	21	32	3	9	40	–
Доля лет (%) с экстремальным уровнем выше $H_{кр макс}$	60,7	88,2	44,7	80,0	16,7	64,3	100	–
Число лет с экстремальным уровнем ниже $H_{кр мин}$	5	0	11	37	1	4	–	38
Доля лет (%) с экстремальным уровнем ниже $H_{кр мин}$	8,2	0	23,4	92,5	5,6	28,6	–	88,4
Число лет без превышения $H_{кр макс}$	24	2	26	8	15	5	0	–
Число лет без принижения $H_{кр мин}$	56	17	36	3	17	10	–	5

Примечание. * — на посту Антипаюта наблюдения в период половодья в 2001 г. отсутствуют, за 2002, 2003 гг. данные за период половодья забракованы, поэтому ряд на три значения короче, чем для сгонов.

Note. * — at the Antipayut post there were no observations during the flood period in 2001; for 2002 and 2003 the data for the flood period were rejected, therefore the series is three values shorter than for the surges.

Данные табл. 4 свидетельствуют, что в Антипаюте отмечалось ежегодное превышение высшего уровня над критическим значением за счет весеннего половодья на реке Антипаюта-Яха, на которой расположен уровенный пост. Больше половины лет с экстремальным уровнем выше $H_{кр\ макс}$ наблюдалось в Каменном (88,2 %), Тадибейхе (80 %), 60 лет ВЛКСМ (64,3 %), Новом Порту (60,7 %). По числу лет со сгонными уровнями ниже минимальных критических отметок на первом месте стоит Тадибейха (92,5 %), за ней следует Антипаюта (88,4 %). В Каменном уровне не опускались ниже критических за весь период наблюдений. Тадибейха выделяется среди остальных постов высокой долей лет с экстремальными годовыми уровнями как выше, так и ниже критических отметок.

Приведенные в табл. 4 сравнительные данные характеризуют частоту проявления экстремальных годовых уровней на постах по выборкам одного из высших или низших значений за год. В табл. 5 и 6 представлено распределение этих значений по месяцам.

Таблица 5

Распределение по месяцам
наибольших годовых превышений уровня над критическими значениями

Table 5

Distribution by month of the largest annual level exceedances over the critical values

Пост	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Новый Порт	–	–	–	–	–	1	4	12	14	7	–	–
Каменный	–	–	–	–	–	2	2	4	4	2	1	–
Сеяха	–	–	–	–	1	9	–	3	6	1	1	–
Тадибейха	–	–	1	–	–	12	–	3	8	5	3	–
Тамбей	–	–	–	–	–	–	–	–	2	–	1	–
60 лет ВЛКСМ	1	–	–	–	1	2	–	1	2	2	1	–
Антипаюта (половодья)	–	–	–	–	–	40	–	–	–	–	–	–
Антипаюта (нагоны)	–	–	–	–	–	–	–	2	2	1	–	–

Примечание. Прочерк означает, что явление не зафиксировано за период, указанный в табл. 1.
Note. A dash means that the phenomenon was not recorded for the period specified in table 1.

Данные табл. 5 показывают, что наибольшие годовые превышения уровня над критическими значениями чаще всего приходится на июнь, август–октябрь. В июле таких случаев сравнительно немного, поскольку в этот период по Обской губе проходят большие объемы речного стока, формирующие основной уровенный фон [9]. Кроме того, для июля характерна самая низкая средняя месячная скорость ветра над Обской губой по сравнению с другими месяцами [10]. В Антипаюте, как отмечено ранее (см. рис. 1), годовые экстремумы превышений уровня над критическими значениями отмечаются ежегодно в июне за счет половодья на реке Антипаюта-Яха.

В отличие от превышений над критическими отметками, вызванных нагонами и половодьями, число наибольших годовых сгонных понижений уровня от $H_{кр\ мин}$ приурочено к периоду август–ноябрь (табл. 6). Чаще всего это явление отмечается в Антипаюте и Тадибейхе. Рис. 2 показывает, что эти же посты подвержены наиболее

Таблица 6

Распределение по месяцам наибольших годовых сгонных понижений уровня относительно $H_{кр\ мин}$

Table 6

Distribution by month of the largest annual surge decreases in level relative to $H_{кр\ мин}$

Пост	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Новый Порт	–	–	–	–	–	–	–	–	4	1	–	–
Каменный	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Сеяха	–	–	–	–	1	–	–	3	3	1	3	–
Тадибейха	2	–	–	2	–	–	1	7	8	8	5	2
Тамбей	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1	–
60 лет ВЛКСМ	1	–	–	–	–	1	–	–	1	1	–	–
Антипаюта	–	–	–	–	–	–	1	3	15	14	3	2

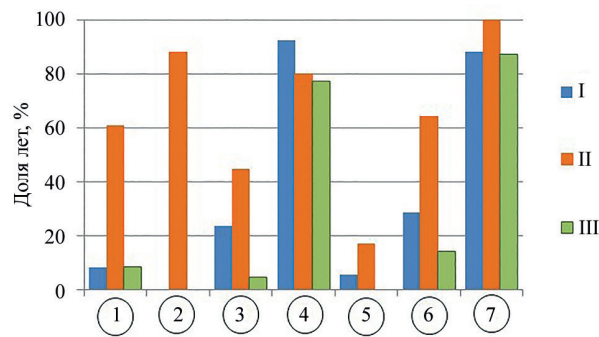


Рис. 2. Доля лет (%) с экстремальными уровнями ниже (I) и выше (II) критических отметок и случаями проявления их в одном и том же году (III). Цифры в кружках соответствуют названиям постов: 1 — Новый Порт, 2 — Каменный, 3 — Сеяха, 4 — Тадибейха, 5 — Тамбей, 6 — 60 лет ВЛКСМ, 7 — Антипаюта

Fig. 2. Proportion of years (%) with extreme levels below (I) and above (II) the critical levels and cases of their occurrence in the same year (III). The numbers in the circles correspond to the names of the posts: 1 — New Port, 2 — Kamenny, 3 — Seyakha, 4 — Tadibeyakha, 5 — Tambey, 6 — 60 years of the Komsomol, 7 — Antipayuta

частому проявлению в одном и том же году неблагоприятных уровней как нагонного (для Антипаюты — половодного), так и сгонного происхождения.

Мы рассмотрели повторяемость случаев наибольших годовых и месячных превышений (понижений) уровня относительно критических значений. Перейдем от частоты проявления экстремумов к рассмотрению величины экстремальных годовых нагонов (половодья) и сгонов. В табл. 7 приведены наибольшие за период наблюдений превышения экстремальных уровней относительно критических отметок, рассчитанные по данным таблиц «Уровни воды» ЕДМ⁴⁻⁶.

Из табл. 7 видно, что максимальные превышения уровня относительно $H_{кр\ макс}$ на всех постах преобладают над величиной максимального понижения относительно $H_{кр\ мин}$. Наибольшая величина максимального превышения и понижения уровня от-

Таблица 7

Наибольшие превышения (ΔH , см) и даты экстремальных уровней
относительно критических отметок,
рассчитанные по данным таблиц «Уровни воды» ЕДМ

Table 7

The greatest exceedances (ΔH , cm) and dates of extreme levels relative to the critical levels,
calculated according to the “Water Levels” tables of the EDM

Характеристика	Новый Порт	Каменный	Сеяха	Тадибеяха	Тамбей	60 лет ВЛКСМ	Антипаюта (половодья)	Антипаюта (сгоны)
Максимальное превышение относительно $H_{кр\ макс}$	131 03.10. 1962	110 22.10. 1987	71 05.08. 2009	91 27.06. 1961	38 04.09. 1979	54 12.10. 1988	174 12.06. 1993	
Максимальное понижение относительно $H_{кр\ мин}$	26 26.10. 1986	—	28 04.09. 2004	56 16.10. 1981	21 20.11. 1982	25 01.01. 1986		87 03.09. 2006

Примечание. Прочерк означает, что явление не зафиксировано за период, указанный в табл. 1. Ячейки, не относящиеся к данной характеристике, не заполнены.

Note. A dash means that the phenomenon was not recorded for the period specified in table 1. Cells not related to this characteristic are not filled in.

носительно $H_{кр}$ за весь период наблюдений принадлежит Антипаюте (174 и 87 см соответственно). В Новом Порту и Каменном максимальные превышения составили 131 и 110 см соответственно. В Тадибеяхе максимальное превышение достигало 91 см, понижение — 56 см. На остальных постах экстремальные превышения находятся в диапазоне 38–71 см, понижения — 21–28 см.

Подчеркнем, что в табл. 7 представлены выборки из экстремальных годовых превышений и понижений, т. е. по одному значению за весь период наблюдений на посту.

О повторяемости величин экстремальных годовых превышений уровня по заданным интервалам над $H_{кр\ макс}$, выбранных по одному значению за каждый год с такими превышениями, позволяет судить рис. 3. Длина этих рядов была приведена в табл. 4.

Рис. 3 показывает, что наиболее часто величина превышений над $H_{кр\ макс}$ в Новом Порту отмечалась в интервалах 21–30 и 51–60 см, в Каменном и Сеяхе — 1–10 см, Тадибеяхе — 11–20 см, 60 лет ВЛКСМ — 31–40 см. Антипаюта заметно отличается от перечисленных постов тем, что данная характеристика приурочена к более высоким значениям интервалов, а именно 91–100 и 141–150 см.

Что касается величин экстремальных годовых понижений уровня относительно $H_{кр\ мин}$, то наибольшая их повторяемость сосредоточена в интервалах 11–20 см для Тадибеяхи (12 случаев из 37) и 21–30 см для Антипаюты (8 случаев из 37). Для постов Новый Порт и Сеяха эта характеристика лежит в пределах интервала 1–10 см, для поста 60 лет ВЛКСМ — 11–20 см.

Отметим, что приведенные сведения характеризуют только экстремальные из годовых превышений или понижений уровня относительно критических отметок

на основе выборок по одному значению за многолетие (см. табл. 7) и, аналогично, за каждый год, в который они наблюдались (см. рис. 3).

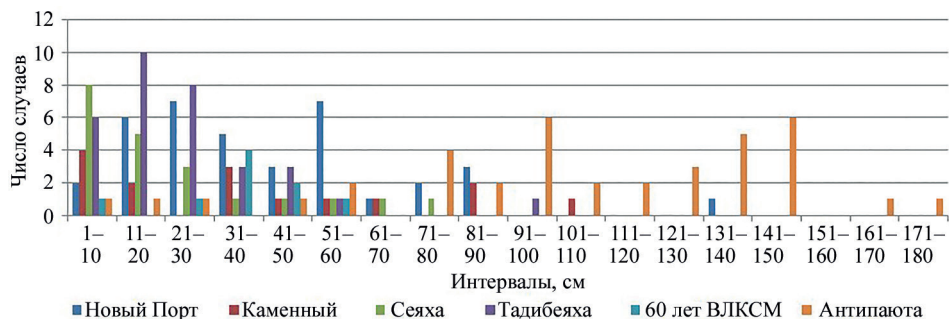


Рис. 3. Повторяемость величин экстремальных за год превышений уровня над $H_{кр макс}$ по заданным интервалам

Fig. 3. Repeatability of extreme annual level exceedances above $H_{кр макс}$ at specified intervals

В то же время в отдельные годы случаются неоднократные превышения или понижения уровня относительно критических отметок. О таких случаях свидетельствуют данные рис. 4 и табл. 8, сформированных по выборкам из табл. 1.1.4 и 2.1.4 ЕДМ, в которых представлены результаты за период 1977–2019 гг. (см. табл. 1). Рис. 4 наглядно отражает качественное соотношение показателей по сгонам и нагонам (включая половодья), табл. 8 содержит обобщенные количественные характеристики показателей.

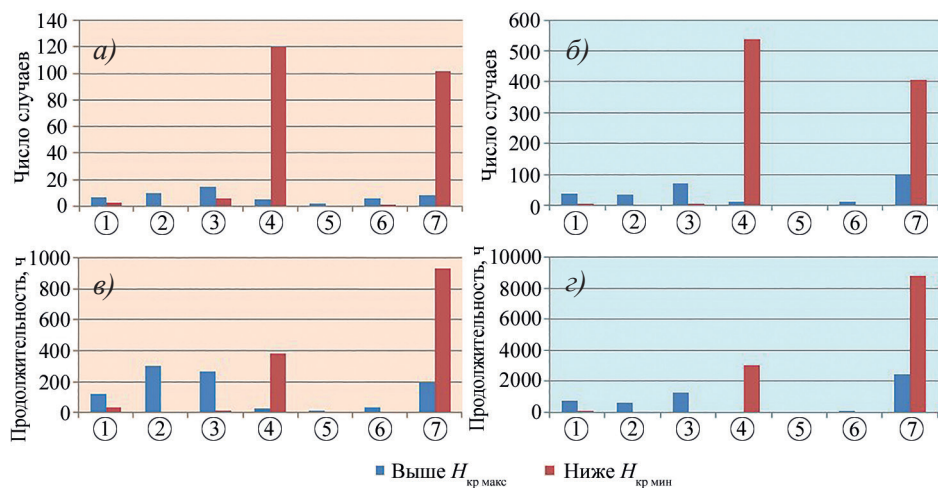


Рис. 4. Максимальное число случаев и продолжительность неоднократного в году стояния уровня относительно критических отметок при сгонах/нагонах за период 1977–2019 гг.: а) за один год; б) за весь период наблюдений; в) суммарная продолжительность за один год; з) продолжительность за весь период наблюдений.

Цифры в кружках соответствуют названиям постов аналогично рис. 2

Fig. 4. The maximum number of cases and duration of repeated per-year levels relative to the critical levels during surges for the period 1977–2019: а) in one year; б) in the entire observation period; в) total duration in one year; з) total duration in the entire observation period.

The numbers in circles correspond to the names of the posts (refer to Fig. 2)

Таблица 8

Характеристики неоднократных в году понижений и превышений уровня относительно $H_{кр}$ по выборкам из всех зафиксированных случаев за период 1977–2019 гг.

Table 8

Characteristics of repeated yearly decreases and increases in level relative to the $H_{кр}$ based on samples from all recorded cases for the period 1977–2019

Пост	Максимальные показатели за один год				Суммарные показатели за весь период	
	Число случаев	Год с числом случаев	$\tau_{\text{макс}}$, час	Год с $\tau_{\text{макс}}$	Число случаев	$\tau_{\text{общ}}$, час
Случаи понижений относительно $H_{кр \text{ мин}}$						
Новый Порт	3	1985	35	1986	6	87
Каменный	—	—	—	—	—	—
Сеяха	6	1981	12	2004	7	37
Тадибеяха	120	1986	381	1986	538	3009
Тамбей	—	—	—	—	—	—
60 лет ВЛКСМ	1	1986	5	1986	1	5
Антипаюта	102	2010	936	2009	406	8775
Случаи превышений над $H_{кр \text{ макс}}$						
Новый Порт	7	1987, 1988	120,2	2009	38	751,4
Каменный	10	1987	304	1988	34	651,5
Сеяха	15	2001	264	2010	71	1276
Тадибеяха	5	1987	24,5	1987	12	50,5
Тамбей	2	1989	12	1989	2	12
60 лет ВЛКСМ	6	1989	35,5	1989	11	72,5
Антипаюта	8	1979, 2014	192	2014	101	2456

Примечание. Прочерк означает отсутствие случаев стояния уровня выше (ниже) $H_{кр}$; $\tau_{\text{макс}}$ — максимальная продолжительность непрерывного стояния уровня, час; $\tau_{\text{общ}}$ — суммарная продолжительность стояния уровня, час.

Note. A dash means that there are no levels above (below) $H_{кр}$; $\tau_{\text{макс}}$ — maximum duration of continuous level standing, hour; $\tau_{\text{общ}}$ — total duration of level standing, hour.

Как видно из рис. 4, Тадибеяха и Антипаюта выделяются по всем показателям. По сравнению с остальными постами для них свойственно преобладание сгонных характеристик над нагонными как по числу случаев, так и по продолжительности стояния уровня, как в годовом, так и в многолетнем периоде.

Из табл. 8 следует, что по максимальному числу случаев понижений уровня относительно $H_{кр \text{ мин}}$ за один год на первом месте стоит Тадибеяха (120 случаев в 1986 г.), по Антипаюте этот показатель составил 102 случая (2010 г.). При этом указанные посты меняются местами по максимальной продолжительности непрерывного стояния уровня при сгонах за один год. В Антипаюте $\tau_{\text{макс}}$ составил 936 часов, в Тадибеяхе — 381 час.

Качественно такая же картина для этих постов складывается и с суммарными значениями числа случаев и продолжительности стояния уровня ниже $H_{кр \text{ мин}}$ за весь период наблюдений. Суммарное число случаев в Тадибеяхе за весь период наблю-

дений достигло 538 значений, в Антипаюте — 406. Суммарная многолетняя продолжительность стояния уровня в Антипаюте составила 8775 часов, т. е. 365,6 суток. Суммарная годовая продолжительность стояния уровня ниже $H_{кр\ мин}$ наиболее часто в Тадибеяхе занимает 4 суток (25 % случаев) и 2 суток (16,7 %), в Антипаюте — 2 и 3 суток (по 16,0 %) и 1 сутки (12,0 %).

Что касается числа случаев стояния уровня выше $H_{кр\ макс}$, то их максимальное значение за один год принадлежит Сеяхе (15 случаев в 2001 г.), за весь период — Антипаюте (101 случай). Наибольшая продолжительность непрерывного стояния уровня выше $H_{кр\ макс}$ за один год отмечена для поста Каменный (304 часа в 1988 г.), за весь период — для Антипаюты (2456 часов).

Чаще всего суммарная годовая продолжительность стояния уровня выше $H_{кр\ макс}$ в Антипаюте занимает 1 сутки (26,9 % случаев) и 5 суток (23,1 %). По 11,5 % случаев приходится на продолжительность около 6 и 8 суток. В Сеяхе наибольшая повторяемость (33,3 %) принадлежит 8-суточной продолжительности, за ней следует 1-суточная продолжительность (22,2 %). В Новом Порту наиболее часто суммарная годовая продолжительность стояния уровня выше $H_{кр\ макс}$ составляет 3 суток (36,4 %), по 18,2 % приходится на продолжительности 2 и 5 суток. В Каменном этот показатель приходится на 1 сутки (50,0 %), в Тадибеяхе — на $\frac{1}{4}$ суток (50,0 %).

Заключение

В работе впервые представлены характеристики неблагоприятных уровней по данным наблюдений на стационарных постах Обской и Тазовской губ. Известно, что от высоты и продолжительности стояния уровня относительно критических отметок зависит размер ущерба, причиняемого такими явлениями. Характеристики экстремальных уровней наиболее востребованы при проектировании прибрежных и береговых сооружений.

Обобщена информация об экстремальных уровнях, приведенных в гидрологических ежегодниках по бассейну Карского моря за период 1953–2019 гг. Сформированные ряды уровней для каждого поста приведены к единой плоскости отсчета за период наблюдений. Длина рядов насчитывает от 14 до 61 значений. В результате выполненного исследования для постов Новый Порт, м. Каменный, Тадибеяха, Сеяха, Тамбей, 60 лет ВЛКСМ, Антипаюта получены следующие характеристики неблагоприятных уровней:

- доля лет с экстремальным уровнем выше критической отметки при нагонах и половодьях и ниже критических отметок при сгонах (см. табл. 4);
- распределение по месяцам случаев наибольших за год превышений уровня выше и ниже критических (см. табл. 5 и 6);
- доля лет со случаями проявления экстремальных за год уровней ниже и выше критических отметок в одном и том же году (см. рис. 2);
- величины наибольших превышений/понижений экстремальных уровней, выбранных по одному значению за весь период наблюдений, и даты их проявления (см. табл. 7);
- повторяемость величин экстремальных превышений/понижений уровня, выбранных за каждый год (см. рис. 3);
- сведения о максимальном количестве неоднократных случаев непрерывного стояния неблагоприятных уровней на посту за один год из многолетнего ряда и суммарном числе случаев за весь период (см. рис. 4 и табл. 8);

– сведения о максимальной продолжительности неоднократных случаев непрерывного стояния неблагоприятных уровней на посту за один год из многолетнего ряда и суммарной продолжительности за весь период (см. рис. 4 и табл. 8).

Установлено, что среди постов, имеющих ряды наблюдений за уровнями свыше 20 лет, по всем показателям стояния уровня ниже критических значений Антипаюта и Тадибеяха подвержены более других постов негативному влиянию. Затем следуют Сеяха и Новый Порт.

Антипаюта находится также на первом месте по всем показателям стояния уровня выше критических значений. Второе место по негативным проявлениям экстремально высоких уровней принадлежит Сеяхе, третье и четвертое — Новому Порту и Тадибеяхе соответственно.

Полученные результаты могут быть использованы при оценке рисков в зависимости от высотного местоположения проектируемого сооружения. Они позволяют учесть возможное неблагоприятное воздействие экстремальных уровней на эти сооружения.

В очередной раз подчеркнута обоснованная в предыдущих работах [4–7] необходимость ежечасных наблюдений за уровнем, поскольку большая дискретность не позволяет обеспечить получение достоверных характеристик экстремумов в условиях резких колебаний уровня, характерных для Обской и Тазовской губ.

Опыт работы с материалами гидрологических ежегодников показал, что превышения наблюденного экстремального уровня целесообразно представлять в ЕДМ часть 2 относительно постоянной величины — критических отметок, а не переменной — среднемесячных значений. Это позволит сразу получать сравнимые величины в многолетнем ряду наблюдений и снимет вопрос, какому месяцу отдать предпочтение при выборе среднего значения в случае, если пик явления отмечается на стыке двух месяцев.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках темы 2.2 Плана НИТР Росгидромета на 2022–2023 гг.

Financing. The research was funded within project 2.2 of Roshydromet Plan NITR 2022–2023.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Иванов В.В. Гидрологический режим низовьев и устьев рек Западной Сибири и проблема оценки его изменений под влиянием территориального перераспределения водных ресурсов. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 1980;55:20–43.
Ivanov V.V. Hydrological regime of the lower reaches and estuaries of rivers in Western Siberia and the problem of assessing its changes under the influence of territorial redistribution of water resources. *Problemy Arktiki i Antarktiki = Arctic and Antarctic Research*. 1980;55:20–43. (In Russ.).
2. Корт В.Г. Непериодические колебания уровня воды в Арктических морях и способы их прогноза. *Труды АН СССР*. 1941;175. 163 с.
Kort V.G. Non-periodic water level fluctuations in the Arctic seas and methods of their forecasting. *Trudy AN SSSR = AARI Proceedings*. 1941;175. 163 p. (In Russ.).
3. Коптева А.В. Уровень и течения Обской губы. *Труды АН СССР*. 1953;59:84–148.
4. Войнов Г.Н., Налимов Ю.В., Пискун А.А., Становой В.В., Усанкина Г.Е. *Основные черты гидрологического режима Обской и Тазовской губ (лед, уровни, структура вод)*. Войнов Г.Н. (ред.). СПб.: Нестор-История; 2017. 192 с.
5. Войнов Г.Н., Пискун А.А. Приливные и сгонно-нагонные колебания уровня у мыса Ям-Сале (Обская губа). *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2016;4(110):51–66.

- Vojnov G.N., Piskun A.A. Tidal and storm surge level fluctuations near Cape Yam-Sale (Gulf of the Ob). *Problemy Arktiki i Antarktiki = Arctic and Antarctic Research*. 2016;(110):51–66. (In Russ.).
6. Пискун А.А., Войнов Г.Н. Сгонно-нагонные колебания уровня воды в Новом Порту (Обская губа). *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2020;66(1):20–37. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-1-20-37>
Piskun A.A., Vojnov G.N. Storm surges in the water level variation in the New Port (gulf of the Ob). *Arctic and Antarctic Research*. 2020;66(1):20–37. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-1-20-37>
7. Войнов Г.Н., Пискун А.А. Приливные и сгонно-нагонные колебания уровня воды в районе м. Каменный (Обская губа). *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2019;65(1):15–33. doi.org/10.30758/0555-2648-2019-65-1-15-33
Vojnov G.N., Piskun A.A. Tidal and storm surges levels variation at the Cape Kamenny (Gulf of the Ob). *Arctic and Antarctic Research*. 2019;65(1):15–33. (In Russ.). doi.org/10.30758/0555-2648-2019-65-1-15-33
8. Пискун А.А. О точности определения средних и экстремальных уровней воды при сокращении сроков наблюдений на постах Обской и Тазовской губ. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2017;4(114):23–36. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2017-0-4-23-36>
Piskun A.A. About the accuracy of definition of average and extreme water levels at reduction of terms of observations on posts of the Ob and Taz estuaries. *Problemy Arktiki i Antarktiki = Arctic and Antarctic Research*. 2017;4(114):23–36. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2017-0-4-23-36>
9. Виноградова Т.А. Анализ взаимодействия волн половодья с колебаниями уровня моря на закрытых устьевых взморьях сибирских рек. *Труды V Всесоюзного гидрологического съезда*. Т. 9. Устья рек. Л.: Гидрометеиздат; 1990. С. 150–159.
10. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Части 1–6. Выпуск 17. Омская и Тюменская области. СПб.: Гидрометеиздат; 1998. 702 с.

МЕТЕОРОЛОГИЯ И КЛИМАТОЛОГИЯ METEOROLOGY AND CLIMATOLOGY

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-2-161-173>

УДК 551.513



Некоторые механизмы формирования аномальной температуры воздуха в летние сезоны на арх. Шпицберген

И.А. Ильющенко¹✉, А.Я. Коржилов¹, Б.В. Иванов^{1,2}

¹ ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

✉ilyushenkova@aari.ru

ИАИ, 0009-0006-9643-3063; АЯК, 0009-0004-2610-450X; БВИ, 0000-0002-6801-5458

Аннотация. Исследованы особенности формирования летних аномальных значений приземной температуры воздуха в районе арх. Шпицберген. В работе использован временной ряд среднемесячных величин приземной температуры воздуха в п. Баренцбург с 1912 по 2023 г. Выявлены значимые различия в характере атмосферной циркуляции, соответствующей аномально теплым и холодным летним сезонам, и рассчитаны корреляционные связи с индексами атмосферной циркуляции. Наибольшая статистически значимая связь аномалий приземной температуры воздуха наблюдается с индексом Арктический диполь, теснота связи в сентябре составила $-0,49$. Проведен спектральный анализ временных рядов индексов атмосферной циркуляции и определены основные периоды колебаний от 2–3 лет до 25 лет.

Ключевые слова: атмосферная циркуляция, Западная Арктика, приземная температура воздуха, современное потепление, циркумполярный вихрь, Шпицберген

Для цитирования: Ильющенко И.А., Коржилов А.Я., Иванов Б.В. Некоторые механизмы формирования аномальной температуры воздуха в летние сезоны на арх. Шпицберген. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2024; 70(2): 161–173. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-2-161-173>

Поступила 24.03.2024

После переработки 05.06.2024

Принята 14.06.2024

Some mechanisms of abnormal surface air temperature formation in the area of the Spitsbergen archipelago in summer

Irina A. Ilyushchenkova¹✉, Alexander Ya. Korzhikov¹, Boris V. Ivanov^{1,2}

¹ State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

² Saint-Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

✉ilyushenkova@aari.ru

IAI, 0009-0006-9643-3063; AYK, 0009-0004-2610-450X; BVI, 0000-0002-6801-5458

Abstract. The temperature in the Arctic is increasing faster than the global average. A question that challenges scientific community is whether the intensity and frequency of dangerous meteorological phenomena in the Arctic are increasing as rapidly. The article presents the results of examining abnormal summer seasons in the area of the Spitsbergen archipelago. The study used data on surface air temperature in Barentsburg obtained from 1912 to 2023. The regional average results showed a statistically significant linear summer trend. The mean summer temperature in Barentsburg is increasing at a rate of 0.2 °C/10 years. Positive and negative extremes of seasonal mean temperature in the summer from June to September were determined as higher than or equal to 1.5 standard deviation. The atmospheric circulation at the sea level pressure and at the height of the geopotential surface of 500 hPa is analyzed, and the localization of surface temperatures anomalies for highlighted abnormal temperature in summer season events is discussed. The results of the analysis of atmospheric circulation revealed significant differences between abnormal warm and cold summer seasons. During abnormally cold summers the circumpolar vortex is located in the polar region and causes the advection of cold air masses from the north of Greenland. In the case of abnormally warm summers the cyclonic vortex is shifted to the Canadian Arctic archipelago and the Baffin Sea, while warm air masses from the Atlantic Ocean enter the area of the Spitsbergen archipelago. The assessment of the statistical significance of the correlation between the time series of surface air temperature anomalies and the atmospheric circulation indices Arctic Oscillation, Arctic dipole, Pacific North American oscillation showed significant results in September with the Arctic Oscillation index, in August and September with the Arctic dipole index, in July with the Pacific North American oscillation index. The greatest statistically significant association of surface air temperature anomalies was found with the Arctic dipole index, the closeness of the connection in September was –0.49. Spectral analysis was carried out and the main periods of atmospheric indices fluctuations from 2–3 years to 25 years were determined.

Keywords: air temperature, atmospheric circulation, polar vortex, recent warming, Spitsbergen, Western Arctic

For citation: Ilyushchenkova I.A., Korzhikov A.Ya., Ivanov B.V. Some mechanisms of abnormal surface air temperature formation in the area of the Spitsbergen archipelago in summer. *Arctic and Antarctic Research*. 2024;70(2):161–173. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-2-161-173>

Received 24.03.2024

Revised 05.06.2024

Accepted 14.06.2024

Введение

Повышение приземной температуры воздуха (ПТВ) в северной полярной области происходит более быстрыми темпами по сравнению с другими регионами [1], данное явление получило название — Арктическое усиление [2]. Это может усложнять процессы межширотного обмена и способствовать возникновению аномальных явлений в температурном режиме приземной атмосферы. В зимний период экстремальные отклонения величин ПТВ от многолетней нормы происходят с большей интенсивностью по сравнению с летним периодом [3, 4]. Экстремальным значениям ПТВ, наблюдаемым в зимний период, посвящено значительное количество исследований [5–8]. Однако также отмечается важность изучения изменений ПТВ в лет-

ний период [9], в связи с влиянием экстремальных значений ПТВ и особенностей атмосферной циркуляции, наблюдаемых в летний сезон, на ледовую обстановку в последующий осенне-зимний период [10].

В настоящем исследовании используются ряды данных, включающие средне-месячные значения ПТВ в районе архипелага Шпицберген за временной промежуток более 100 лет, описывающий особенности изменений ПТВ в период потепления начала двадцатого века и «современного» потепления в Арктике, что создает наиболее полное представление о региональных колебаниях ПТВ на арх. Шпицберген в XX и XXI в.

Исследуя долгопериодные колебания ПТВ, в том числе ее экстремальные значения, необходимо кратко охарактеризовать физико-географические особенности арх. Шпицберген. Район расположения арх. Шпицбергена является наиболее чувствительным к климатическим изменениям в Арктике и прилегающих районах Норвежского, Баренцева и Гренландского морей. Это связано с поступлением воздушных масс, формирующихся в различных климатических зонах. С юго-запада поступают в основном теплые и влажные воздушные массы из района Северной Атлантики. С севера поступает холодный и сухой воздух с приполюсного района. Район архипелага расположен к северу от среднего положения климатической границы двух воздушных масс: арктической холодной воздушной массы и более теплого воздуха умеренных широт. Изменения характеристик этих воздушных масс непосредственно отражаются на изменениях метеорологических параметров в районе арх. Шпицберген. Также следует отметить близкое расположение архипелага к климатическому арктическому фронту, простирающемуся от Исландии к арх. Новая Земля. В зоне влияния этого фронта наблюдается активная циклоническая деятельность. К юго-западу от Шпицбергена расположен важнейший центр действия атмосферы — исландский минимум (депрессия), где формируются циклоны, определяющие перенос теплых и влажных североатлантических воздушных масс в сторону архипелага. Также в непосредственной близости к архипелагу расположен еще один центр действия атмосферы — арктический максимум (антициклон). Под влиянием арктического максимума в район Шпицбергена могут поступать более холодные воздушные массы [11, 12].

Цель настоящей работы состоит в изучении особенностей атмосферной циркуляции при формировании аномально холодных и теплых летних сезонов на арх. Шпицберген, выявлении местоположений основных барических образований на приземном уровне и в верхней тропосфере, изучении формирующихся очагов аномалий ПТВ и выявлении взаимосвязи с индексами атмосферной циркуляции.

Район исследования и используемые данные

Для изучения особенностей формирования аномальных летних сезонов на арх. Шпицберген выбран пункт Баренцбург, расположенный в заливе Грён-фьорд на острове Западный Шпицберген. В исследовании использовали композитный ряд среднемесячных данных о ПТВ (1912–2023 гг.) [13]. На основе данных реанализа NCEP/NCAR, доступных на соответствующем сайте [14], построены средние для выделенных сезонов карты атмосферного давления на уровне моря и высоте стандартной изобарической поверхности 500 гПа. Для изучения пространственных аномалий ПТВ использовали данные наблюдений 175 метеорологических станций, собранные в Центре ледовой и гидрометеорологической информации (ЦЛГМИ)

Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ). При построении карт аномалий ПТВ использовалась новая климатическая норма ВМО, соответствующая периоду 1991–2020 гг. [15]. В работе использованы данные первой, второй, третьей мод разложения по естественным ортогональным функциям полей давления на уровне моря от 70° с. ш. до Северного полюса с использованием реанализа ERA-5 Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды [16]. Результаты расчетов предоставлены сотрудником отдела океанологии ААНИИ Н.А. Лис.

В исследовании применяли методы статистической обработки данных, спектральный анализ временных рядов. Получены оценки стандартных отклонений, линейного тренда, экстремальных значений ПТВ, проведена проверка статистической значимости полученных результатов по критериям Колмогорова–Смирнова и по t -критерию Стьюдента [17].

Анализ и результаты

В первую очередь нами были проведены оценки на нормальность распределения имеющегося временного ряда ПТВ по критерию Колмогорова–Смирнова. Полученные значения вероятности, равные $p > 0,05$, свидетельствуют, что эмпирическое распределение существенно не отличается от нормального распределения генеральной совокупности, и последующие статистические процедуры (оценки трендов) позволяют объективно и обоснованно интерпретировать полученные результаты.

Для оценки аномальных повышений и понижений ПТВ в летний сезон были использованы ее средние значения за период июнь–сентябрь. Рис. 1 демонстрирует межгодовые колебания этих значений и характер трендов с 1912 по 2023 г. В первую очередь отмечается положительный линейный тренд со скоростью роста средней за летний сезон ПТВ, равной $0,2^\circ\text{C}/10$ лет. Линейный тренд значим на уровне $p = 0,05$, что свидетельствует о достоверности полученных результатов.

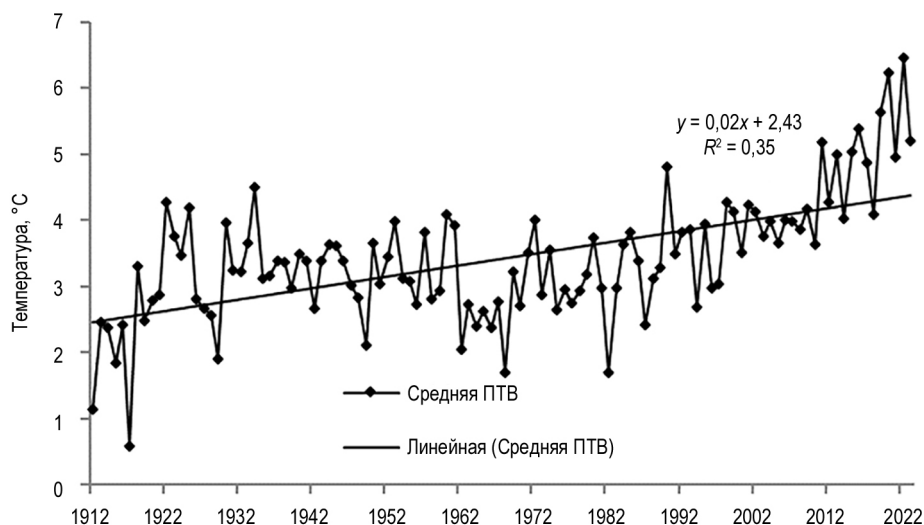


Рис. 1. Временные изменения летних значений ПТВ в Баренцбурге с 1912 по 2023 г.

Fig. 1. Variability of mean summertime SAT in Barentsburg from 1912 to 2023

Аномально холодные и теплые летние сезоны

Для исключения влияния естественной изменчивости и долгопериодных изменений климата временной ряд был разделен на периоды 1912–1950 гг., 1951–1990 гг., 1991–2022 гг. Для каждого были рассчитаны среднее значение ПТВ и стандартное отклонение, выделены аномально холодные и теплые летние сезоны. Используемая в нашем исследовании выборка данных о ПТВ подчиняется закону нормального распределения, и все возможные отклонения попадают в интервал ± 3 стандартного отклонения. К экстремальным значениям ПТВ отнесены все значения в выборке, которые отличаются от нормального значения (в данном случае среднее многолетнее значение ПТВ для каждого из трех интервалов) на 1,5 стандартного отклонения и больше. В табл. 1 приведены летние сезоны с экстремально низкими и высокими средними значениями ПТВ. Аномально холодные летние сезоны отмечались до 1996 г., в последние три десятилетия не было зафиксировано экстремального отклонения летних величин ПТВ (превышающих 1,5 стандартного отклонения) в отрицательную область. Повторяемость аномально теплых летних сезонов возросла в последнее десятилетие.

Таблица 1

Летние сезоны с аномально низкими и высокими средними ПТВ в Баренцбурге

Table 1

Summers with abnormally low and high average SAT in Barentsburg

Аномально теплое лето, годы	Средняя температура воздуха, °C	Аномально холодное лето, годы	Средняя температура воздуха, °C
1922	+4,3	1912	+1,1
1934	+4,5	1917	+0,6
1960	+4,1	1962	+2,1
1990	+4,8	1968	+1,7
2019	+5,6	1982	+1,7
2020	+6,2	1994	+2,7
2022	+6,5	1996	+3,0

Проверка по t-критерию Стьюдента показала, что для всех месяцев средние значения ПТВ при уровне значимости 0,05 существенно различаются для аномально холодных и теплых летних периодов. Таким образом, вероятность ошибочно найти различия в целом за период и внутри каждого месяца составляет не более 5 %.

Поскольку выводы об экстремальных значениях ПТВ на Шпицбергене были сделаны нами на основании данных, имеющихся для пункта Баренцбург, мы оценили связь экстремальных значений ПТВ в Баренцбурге с данными наблюдений на станциях Лонгйир, Хорнсунд, Ис-фьорд Радио, Пирамида, Нью-Олесунн, которые также расположены на западе арх. Шпицберген. Нами были рассчитаны парные коэффициенты корреляции между указанными выше станциями. Для станций Хорнсунд, Пирамида, Нью-Олесунн использован доступный ряд наблюдений с 1947 по 2023 г. На станции Лонгйир доступны данные ПТВ с 1899 до 2023 г., для станции Ис-фьорд Радио использовался более короткий ряд с 1947 по 2014 г. Статистический анализ

показал очень высокую связь ПТВ в Баренцбурге с ПТВ на вышеуказанных станциях (коэффициенты корреляции r находятся в диапазоне 0,92–0,99 и статистически значимы на принятом для исследования уровне значимости 0,05).

Условия формирования аномальных периодов в летний сезон

Отмечается на основании анализа карт геопотенциальных высот изобарической поверхности 500 гПа, что при формировании аномально холодных летних сезонов циркулярный вихрь расположен в приполюсном районе (рис. 2а) и вызывает адвекцию холодных воздушных масс от севера Гренландии к арх. Шпицберген. На приземном уровне в летние сезоны на композитных картах наблюдается достаточно размытое барическое поле в районе арх. Шпицберген, отмечается циклоническая активность в районе Северной Атлантики и в приполюсном районе (см. рис. 2б). В районе Шпицбергена наблюдаются значения ПТВ ниже средних многолетних на 1,5 °C (рис. 3а).

Рассмотрим основные особенности барических полей, при которых наблюдаются аномально теплые летние сезоны. Анализ карты геопотенциальных высот изобарической поверхности 500 гПа (см. рис. 2б) показал, что при формировании

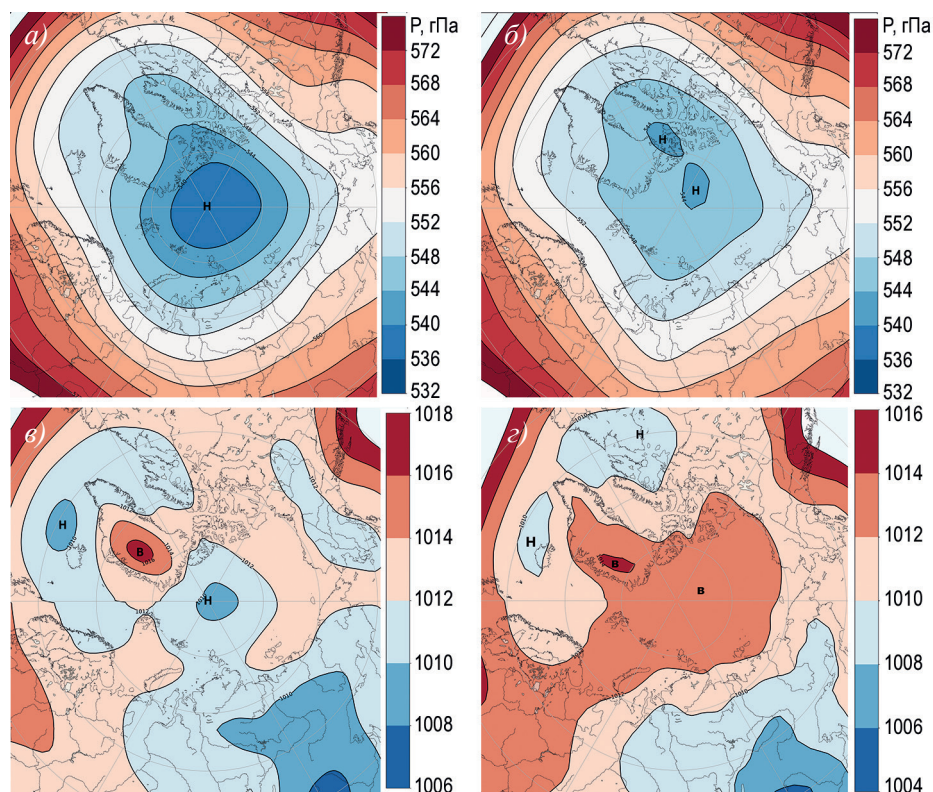


Рис. 2. Композитные карты геопотенциальных высот изобарической поверхности 500 гПа, гп. м и карты приземного поля давления, гПа, для аномально холодных (а и в соответственно) и аномально теплых (б и з соответственно) летних сезонов

Fig. 2. Composite maps for 500 hPa geopotential height field, gpm and sea level pressure field, hPa for abnormally cold summers (a and в, accordingly) and abnormally warm summers (б and з, accordingly)

аномально теплых летних сезонов циклонический вихрь смещен на Канадский Арктический архипелаг и в район моря Баффина. В районе арх. Шпицберген и Баренцева моря усиливается слабовыраженный барический гребень. При этом в район арх. Шпицберген поступают теплые воздушные массы с Атлантического океана.

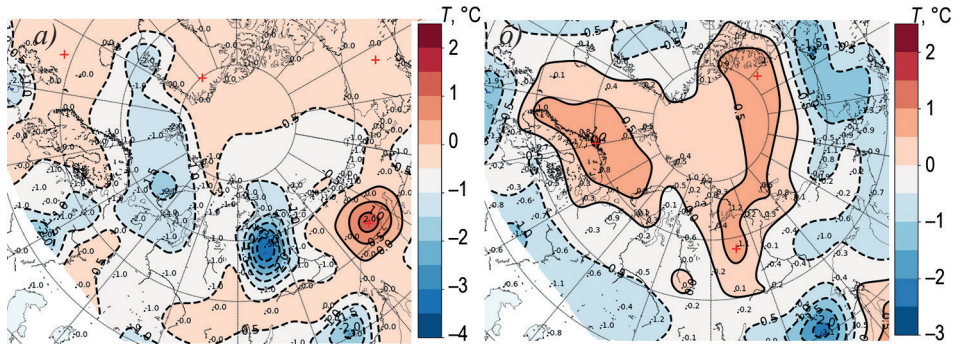


Рис. 3. Композитные карты аномалий ПТВ, °C, для аномально холодных (а) и аномально теплых (б) летних сезонов

Fig. 3. Composite maps for surface air temperature anomalies, °C for abnormally cold summers (a) and abnormally warm summers (b)

На приземном уровне формируется антициклональная область, простирающаяся от Баренцева моря и арх. Шпицберген до приполюсного сектора Восточно-Сибирского моря (см. рис. 2г). В районе арх. Шпицберген формируется положительная аномалия ПТВ на 0,5 °C выше средней климатической нормы (см. рис. 3б).

Для оценки связи формирования экстремальных значений ПТВ летом с индексами атмосферной циркуляции использованы данные разложения атмосферного давления на уровне моря от 70° с. ш. до полюса по естественным ортогональным функциям (Empirical Orthogonal Function, EOF). Рассмотрены атмосферные индексы, представляющие собой: первую моду разложения на естественные ортогональные функции (EOF1) — Арктическое колебание (Arctic Oscillation, AO); вторую моду разложения (EOF2) — Арктический диполь (Arctic Dipole, AD); третью моду (EOF3) — Тихоокеанско-Североамериканский индекс (Pacific North American oscillation, PNA).

Для анализа использованы среднемесячные данные ПТВ в июне, июле, августе и сентябре для каждого из выделенных экстремальных сезонов и среднемесячные данные индексов атмосферной циркуляции для соответствующих месяцев за период с 1949 по 2023 г.

В результате статистического анализа выявлено, что взаимосвязь экстремальных значений ПТВ с индексами атмосферной циркуляции различна в зависимости от месяца. В июне обнаружена очень слабая и статистически не значимая при уровне значимости 0,05 корреляционная связь с тремя рассматриваемыми индексами. Это указывает на то, что вероятность обнаружить летом ошибочную взаимосвязь между экстремальными значениями ПТВ и рассматриваемыми индексами атмосферной циркуляции составляет более 5 %. В дальнейшем исследовании указанный месяц нами не рассматривался.

В июле обнаружена слабая, но статистически значимая корреляционная связь с индексом PNA (коэффициент корреляции $r = 0,27$). На следующем этапе для данного месяца рассмотрена повторяемость положительных и отрицательных фаз индекса

PNA при формировании аномально теплых и холодных летних сезонов. Ввиду не обнаружения статистически значимой связи в июле с индексами АО и АД данные индексы в последующем нами также не рассматривались.

В августе отмечается слабая, но статистически значимая связь с индексом АД (коэффициент корреляции $r = -0,27$). Для остальных рассматриваемых индексов выявлена очень слабая связь, и в дальнейшем они также не использовались.

В сентябре для всех индексов наблюдалось повышение коэффициента корреляции по модулю. Теснота связи экстремальных значений ПТВ с индексом АО составила величину 0,28, с индексом АД $r = -0,49$. С индексом PNA связь статистически не значима.

Повторяемость положительных и отрицательных фаз индексов атмосферной циркуляции для месяцев, в которые получены значимые результаты при оценке корреляционной связи, представлена в табл. 2 и 3.

При формировании аномально теплых летних сезонов в сентябре в 60 % случаев преобладает отрицательная фаза индекса АО, в 40 % случаев положительная. Анализ данных индекса АД показал, что при формировании аномально теплых сезонов преобладают положительные фазы индекса в августе и сентябре (80 % и 60 % соответственно). Повторяемость отрицательных фаз индекса PNA в июле составила 60 % в аномально теплые летние сезоны, и, соответственно, в 40 % случаев наблюдалась положительная фаза индекса PNA.

Таблица 2

Повторяемость положительных фаз индексов АО, АД, PNA

Table 2

Repeatability of positive AO, AD, PNA indices

Повторяемость положительных индексов для аномально теплых летних сезонов, %			Повторяемость положительных индексов для аномально холодных летних сезонов, %			Месяц
АО	АД	PNA	АО	АД	PNA	
–	–	40	–	–	40	июль
–	80	–	–	80	–	август
40	60	–	40	40	–	сентябрь

Таблица 3

Повторяемость отрицательных фаз индексов АО, АД, PNA

Table 3

Repeatability of negative AO, AD, PNA indices

Повторяемость отрицательных индексов для аномально теплых летних сезонов, %			Повторяемость отрицательных индексов для аномально холодных летних сезонов, %			Месяц
АО	АД	PNA	АО	АД	PNA	
–	–	60	–	–	60	июль
–	20	–	–	20	–	август
60	40	–	60	60	–	сентябрь

При рассмотрении аномально холодных летних сезонов в сентябре отмечалась повторяемость отрицательных фаз индекса АО в 60 % случаев, соответственно в 40 % случаев наблюдалась положительная фаза данного индекса. Положительные фазы индекса AD в августе и сентябре отмечались в 80 % и 40 % соответственно. Отрицательные фазы индекса AD августа зафиксированы в 20 % случаев, в сентябре в 50 % случаев. В аномально холодные летние сезоны в июне отмечалось преобладание отрицательных фаз индекса PNA (60 %), положительные фазы отмечены в 40 %.

Для изучения доминирующих периодов колебания индексов атмосферной циркуляции и временного ряда аномалий ПТВ был применен спектральный анализ. Используемое для спектрального анализа дискретных временных рядов одномерное преобразование Фурье позволяет выделить наиболее значимые периодичности. При данном анализе временные ряды индексов атмосферной циркуляции и аномалий ПТВ рассматриваются как упорядоченное множество случайных величин. Временные ряды индексов атмосферной циркуляции, по результатам теста Колмогорова–Смирнова, имеют нормальное распределение. Согласно общим свойствам преобразования Фурье, периодичности в рядах наблюдений в спектре проявляются в виде пиков на частоте, соответствующей периоду. Для спектрального анализа использован одинаковый временной ряд для индексов атмосферной циркуляции и аномалий ПТВ с 1949 по 2023 г. На рис. 4 представлен график спектральной плотности временных рядов аномалий ПТВ в летний сезон и индексов атмосферной циркуляции АО, AD, PNA.

Во время летнего сезона для индексов АО, AD и PNA отмечены наиболее значимые максимумы на частотах, соответствующих периодам 2–3 года, и низкочастотная изменчивость с периодами 5–6 лет и 15 лет. Для атмосферного индекса АО также характерен максимум, соответствующий периоду 7 лет, а также для ин-

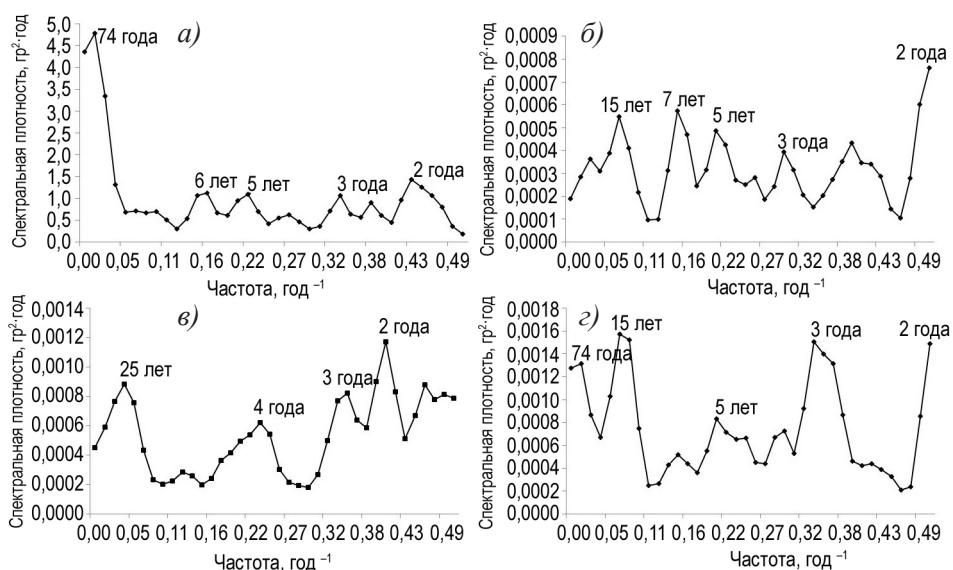


Рис. 4. Спектральная плотность временных рядов аномалий ПТВ (а) и индексов атмосферной циркуляции АО (б), AD (в), PNA (г)

Fig. 4. Spectral density of variability of mean summertime anomaly SAT (a) and atmospheric circulation indices AO (b), AD (v), PNA (z)

декса AD максимальные пики для 4-летнего и 25-летнего периодов. По результатам спектрального анализа аномалий ПТВ в летний сезон выделены периоды 2–3 года и 5–6 лет и максимальный пик, соответствующий используемому временному ряду для спектрального анализа, — 74 года.

Обсуждение полученных результатов

В данном исследовании проанализированы ряды среднемесячных значений ПТВ в летний период (июнь–сентябрь) в п. Баренцбург с 1912 по 2023 г. и выделены аномально холодные и теплые летние сезоны. Для этих сезонов рассмотрены синоптические процессы на приземном уровне и в верхней тропосфере. При формировании аномально холодных и теплых летних сезонов выявлены различия в положении высотного циркумполярного вихря.

В летний период аномалии ПТВ в районе арх. Шпицберген в среднем за сезон составляют 0,5–1,5 °C, по сравнению с зимним периодом [18], когда величины аномалий достигают 2–4 °C, летом отклонения от нормы менее выражены. В летний период также наблюдаются аномальные сезоны, но со значительно меньшим отклонением от климатической нормы ПТВ. В работе [3] также отмечается более умеренное проявление периодов потепления и похолодания в Арктике по сравнению с зимним сезоном.

Скорость роста летней ПТВ в районе п. Баренцбург составила 0,2 °C/10 лет за период с 1912 по 2023 г. Для сравнения скорость роста ПТВ в Лонгйире в летний период (с июня по август) с 1976 по 2010 г. составила 0,5 °C/10 лет [19] и в зимний период (сентябрь–май) с 1975 по 2008 г. 1,65 °C/10 лет [20]. Для обоих пунктов в летний сезон скорость роста ПТВ значительно меньше, но также статистически значима.

Начиная с 1996 г. аномально холодные летние сезоны перестали отмечаться и увеличилась повторяемость аномально теплых летних сезонов, особенно в последнее десятилетие. Это согласуется с результатами, представленными в работе [9], в которой также отмечается сокращение числа аномально холодных летних дней и повышение числа аномально теплых летних дней в районах к северу от 60° с. ш. после 1994 г.

Результаты анализа композитных карт давления на уровне моря для аномально теплого периода согласуются с данными, полученными в нашей предшествующей работе [21], в которой рассматривались типы атмосферной циркуляции, наблюдающиеся в летний период, при которых формируются положительные аномалии ПТВ в районе арх. Шпицберген. Полученные нами результаты согласуются с выводами, сделанными в работе [22], в которой лето 1982 г. выделяется как одно из самых холодных на Шпицбергене, когда преобладала циклоническая циркуляция, обеспечивающая поступление воздушных масс с севера. В исследовании [23], выполненном для периода 2013–2017 гг., авторы выделяют самый холодный июль в 2014 г., а самый теплый — в 2016 г. В наших исследованиях данные годы как аномальные не выделяются. Очевидно, это связано с тем, что в результате осреднения значений ПТВ для всего летнего сезона (четыре месяца), данные годы не отмечены как аномально холодные или теплые.

Рассмотрена взаимосвязь индексов AO, AD, PNA и значений ПТВ для аномальных летних сезонов. Для июня статистически значимая корреляционная связь не найдена, в июле она обнаружена с индексом PNA, в августе с индексом AD, в сентябре с индексами AO и AD. В нашем исследовании наиболее высокая корреляционная связь экстремальных значений ПТВ обнаружена с индексом AD, которая в сентябре оценивается коэффициентом корреляции, равным –0,49. Это согласуется

с результатами, полученными в работе [9], где также обнаружен наибольший вклад индекса AD в тренды экстремальных значений ПТВ в летний сезон. Арктический диполь отражает меридиональный перенос воздушных масс, в зависимости от фазы индекса воздушные массы движутся в направлении от Берингова пролива к Гренландскому и Баренцеву морям и наоборот. В анализе атмосферной циркуляции при формировании аномальных сезонов преобладает меридиональная составляющая при переносе воздушных масс, в аномально теплых сезонах воздушные массы поступают с Северной Атлантики в район арх. Шпицберген, при формировании аномально холодных сезонов траектория воздушных масс проходит в обратном направлении: от севера Гренландии к архипелагу. Спектральный анализ временных рядов индексов циркуляции АО, AD, PNA и аномалий ПТВ в летний сезон позволил выделить наиболее значимые цикличности. Для индексов атмосферной циркуляции наиболее встречающиеся цикличности: квазидвухлетние (пики 2–3 года), квазিশестилетние (пики 5–6 лет), квазипятнадцатилетние (пики 15 лет). Для аномалий ПТВ характерны цикличности: квазидвухлетние (пики 2–3 года), квазিশестилетние (пики 5–6 лет). В межгодовой изменчивости рассматриваемых индексов атмосферной циркуляции и региональных аномалий ПТВ в летний сезон на арх. Шпицберген наиболее встречающиеся колебания приходятся на период 2–3 года и 5–6 лет. Однако в работе [24] период колебаний менее 3 лет отнесен к «погодному шуму».

Выводы

1. При формировании аномально холодных и теплых летних сезонов в верхней тропосфере наблюдаются существенные различия в расположении циркумполярного вихря.
2. В случае аномально холодных летних сезонов циркумполярный вихрь расположен в приполюсном районе и вызывает адвекцию холодных воздушных масс от севера Гренландии к арх. Шпицберген. На приземном уровне отмечается циклоническая активность в районе Северной Атлантики и приполюсном районе, в районе Шпицбергена наблюдаются средние температуры воздуха ниже многолетних на 1,5 °С.
3. Для аномально теплых летних сезонов циклонический вихрь смещен на Канадский Арктический архипелаг и в район моря Баффина. В районе арх. Шпицберген и Баренцева моря усиливается барический гребень. Вдоль западной периферии арктического антициклона теплые воздушные массы с Атлантического океана поступают в район арх. Шпицберген. На приземном уровне над рассматриваемым районом формируется антициклональная область и положительные аномалии ПТВ, равные 1 °С относительно климатической нормы.
4. Для аномально холодных летних сезонов найдена статистически значимая связь июльских аномалий ПТВ с индексом PNA ($r = 0,27$), аномалий в августе с индексом AD ($r = -0,27$), в сентябре с индексами АО ($r = 0,27$) и AD ($r = -0,49$). Наибольшая статистически значимая связь аномалий ПТВ с индексом AD обнаружена в сентябре. По результатам спектрального анализа временных рядов индексов атмосферной циркуляции АО, AD, PNA и аномалий ПТВ выделены наиболее часто встречающиеся цикличности: квазидвухлетние (пики 2–3 года), квазিশестилетние (пики 5–6 лет).

Конфликт интересов. У авторов исследования нет конфликта интересов.

Финансирование. Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ № 24-27-00112 «Современные изменения арктического климата и экстремальные колебания погоды в западном секторе Северного морского пути».

Competing interests. The authors have no conflict of interest to declare.

Funding. This study was made within the framework of Russian Science Foundation grant 24-27-00112 “Current changes in the Arctic climate and extreme weather fluctuations in the western sector of the Northern Sea Route”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. СПб.: Научные технологии; 2022. 124 с.
2. Latonin M.M., Bashmachnikov I.L., Bobylev, L.P. The Arctic amplification phenomenon and its driving mechanisms. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika = Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2020;13(3):3–19. <https://doi.org/10.7868/S2073667320030016>
3. Matthes H., Rinke A., Dethloff K. Recent changes in Arctic temperature extremes: warm and cold spells during winter and summer. *Environmental Research Letters*. 2015;10(11):114020. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/11/114020>
4. Papritz L. Arctic lower-tropospheric warm and cold extremes: Horizontal and vertical transport, diabatic processes, and linkage to synoptic circulation features. *Journal of Climate*. 2020;33(3):993–1016. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0638.1>
5. Cullather R.I., Lim Y.-K., Boisvert L.N., Brucker L., Lee J.N., Nowicki S.M.J. Analysis of the warmest Arctic winter, 2015–2016. *Geophysical Research Letters*. 2016;43(20):10808–10816. <https://doi.org/10.1002/2016GL071228>
6. Cassano J.J., Cassano E.N., Seefeldt M.W., Gutowski Jr W.J., Glisan J.M. Synoptic conditions during wintertime temperature extremes in Alaska. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2016;121(7):3241–3262. <https://doi.org/10.1002/2015JD024404>
7. Graham R.M., Cohen L., Petty A.A., Boisvert L.N., Rinke A., Hudson S.R., Granskog M.A. Increasing frequency and duration of Arctic winter warming events. *Geophysical Research Letters*. 2017; 44(13):6974–6983. <https://doi.org/10.1002/2017GL073395>
8. Sui C., Zhang Z., Yu L., Li Y., Song M. Investigation of Arctic air temperature extremes at north of 60° N in winter. *Acta Oceanologica Sinica*. 2017;36:51–60. <https://doi.org/10.1007/s13131-017-1137-5>
9. Sui C.J., Yu L.J. Trends of summertime extreme temperatures in the Arctic. *Adv. Polar Sci*. 2018;29(3):205–214. <https://doi.org/10.13679/j.advps.2018.3.00205>
10. Serreze M.C., Stroeve J., Barrett A.P., Boisvert L.N. Summer atmospheric circulation anomalies over the Arctic Ocean and their influences on September sea ice extent: A cautionary tale. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2016;121(19):11463–11485. <https://doi.org/10.1002/2016JD025161>
11. Воробьев В.И. *Синоптическая метеорология*. Л.: Гидрометеиздат; 1991. 616 с.
12. Угрюмов А.С., Лаврова И.В. *Основные закономерности общей циркуляции атмосферы: учебное пособие*. СПб.: РГТМУ; 2021. 72 с.
13. Демин В.И., Иванов Б.В., Ревина А.Д. Восстановление ряда приземной температуры воздуха на российской станции в поселке Баренцбург (Шпицберген). *Российская Арктика*. 2020;2(8):30–40. <https://doi.org/10.24411/2658-4255-2020-12093>
Demin V.I., Ivanov B.V., Revina A.D. Reconstruction of air temperature series at Russian station in Barentsburg (Svalbard). *Rossiiskaia Arktika = Russian Arctic*. 2020;2(8):30–40. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/2658-4255-2020-12093>
14. *Physical Sciences Laboratory*. URL: <https://downloads.psl.noaa.gov/Datasets/ncp.reanalysis.dailyavgs/surface/> (accessed 15.09.2023).
15. Карандашева Т.К., Демин В.И., Иванов Б.В., Ревина А.Д. Изменения температуры воздуха в Баренцбурге (Шпицберген) в XX–XXI вв. Обоснование введения новой климатической нормы. *Российская Арктика*. 2021;2(13):26–39. <https://doi.org/10.24412/2658-4255-2021-2-26-39>

- Karandasheva T.K., Demin V.I., Ivanov B.V., Revina A.D. Air temperature changes in Barentsburg (Svalbard) in XX–XXI centuries. Justification for introducing a new climate standart. *Rossiiskaya Arktika = Russian Arctic*. 2021;2(13):26–39. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2658-4255-2021-2-26-39>
16. *Climate Data Store*. URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home/> (accessed 12.12.2023).
17. Дегтярев А.С., Драбенко В.А. *Статистические методы обработки метеорологической информации*. СПб.: ООО «Андреевский издательский дом»; 2015. 225 с.
18. Ильюшенкова И.А., Коржиков А.Я., Иванов Б.В. Некоторые закономерности формирования экстремальных приземных температур воздуха в районе архипелага Шпицберген в холодный период года. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2023;69(2):141–156. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-2-141-156>
- Ilyushchenkova I.A., Korzhikov A.Ya., Ivanov B.V. Some patterns of formation of extreme surface air temperature in the area of the Svalbard archipelago during the cold period. *Arctic and Antarctic Research*. 2023;69(2):141–156. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-2-141-156>.
19. Bednorz E., Kolendowicz L. Summer mean daily air temperature extremes in Central Spitsbergen. *Theoretical and applied climatology*. 2013;113:471–479. <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0798-4>
20. Bednorz E. Occurrence of winter air temperature extremes in Central Spitsbergen. *Theoretical and Applied Climatology*. 2011;106:547–556. <https://doi.org/10.1007/s00704-011-0423-y>
21. Ильюшенкова И.А., Коржиков А.Я., Александров В.Я. Характеристики полей приземного давления и аномалий температуры воздуха в Арктике в период глобального потепления. *Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета*. 2015;40:142–149.
- Ilyushchenkova I.A., Korzhikov A.Ya., Aleksandrov V.Ya. Features fields of surface pressure and air temperature anomalies in the Arctic in the period of global warming. *Ucheniye zapiski RGMU = Scientific notes of RSHU*. 2015;40:142–149. (In Russ.)
22. Arażny A., Przybylak R., Kejna M. The Influence of Atmospheric Circulation on Mean and Extreme Weather Conditions on Kaffiøyra (NW Spitsbergen, Svalbard Archipelago) in the Summer Seasons 1975–2015. *Frontiers in Environmental Science*. 2022;10:867106. <https://doi.org/10.1002/joc.5172>
23. Kejna M., Sobota I. Meteorological conditions on Kaffiøyra (NW Spitsbergen) in 2013–2017 and their connection with atmospheric circulation and sea ice extent. *Polish Polar Research*. 2019;40(3):175–204. <https://doi.org/10.24425/ppr.2019.129670>
24. Алексеев Г.В., Глок Н.И., Смирнов А.В., Вязилова А.Е. Влияние Северной Атлантики на колебания климата в районе Баренцева моря и их предсказуемость. *Метеорология и гидрология*. 2016;8:38–56.
- Alekseev G.V., Glok N.I., Smirnov A.V., Vyazilova A.E. The influence of the North Atlantic on climate variations in the Barents Sea and their predictability. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2016;41(8):544–558. <https://doi.org/10.3103/S1068373916080045>

ГИДРОЛОГИЯ СУШИ И ГИДРОХИМИЯ HYDROLOGY OF LAND AND HYDROCHEMISTRY

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-2-174-184>

УДК 556.536(282.256.21)



Использование теории ландшафтоведения для оценки распространения различных типов речных русел на территории Арктической зоны Российской Федерации

А.И. Баскакова✉

Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург, Россия

✉priem@ggi.nw.ru

АИБ, 0009-0007-1713-3044

Аннотация. В статье представлена оценка распределения типов русел рек в однородных ландшафтных районах Арктической зоны Российской Федерации, расположенных в различных мерзлотных условиях. Впервые составлена схема распределения типов речных русел для средних рек районов Арктической зоны Российской Федерации, основанная на типизации, разработанной для условий многолетней мерзлоты. Анализ показал, что для тундровых ландшафтов характерно большее распространение неограниченных аллювиальных рек, по сравнению с таежными ландшафтами. Также отмечается низкая доля орографических меженных русел в условиях сплошной мерзлоты. Орографические паводочные русла не характерны для ландшафтов восточноевропейских групп и встречаются в сибирских группах ландшафтов, что объясняется совокупностью влияния ограничивающих условий и типов мерзлоты. Отмечается рост ограниченных аллювиальных русел от арктундровых ландшафтов к ландшафтам таежных групп. В результате оценки показано, что на типы речных русел оказывает влияние мерзлота, определяя характер руслоформирования в регионе.

Ключевые слова: Арктическая зона Российской Федерации, гидроморфологическая теория, меандрирование, многолетняя мерзлота, русловедение, русловой процесс

Для цитирования: Баскакова А.И. Использование теории ландшафтоведения для оценки распространения различных типов речных русел на территории Арктической зоны Российской Федерации. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2024;70(2):174–184. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-2-174-184>

Поступила 02.04.2024

После переработки 08.04.2024

Принята 17.05.2024

Using the theory of landscape studies to assess the distribution of different types of riverbeds in the Arctic zone

Anastasiya I. Baskakova✉

State Hydrometeorological Institute, St. Petersburg, Russia

✉priem@ggi.nw.ru

IAIB, 0009-0007-1713-3044

Abstract. The paper presents an assessment of the distribution of riverbed types in homogeneous landscape areas of the Arctic zone located in various permafrost conditions. The Arctic territories of the Komi Republic, the Nenets Autonomous Okrug, Yakutia, the Krasnoyarsk Territory and the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug are considered. For the first time, a distribution scheme of riverbed types for the middle rivers of the Russian Arctic regions has been compiled, based on a typification developed for permafrost conditions. The analysis showed that tundra landscapes are characterized by a greater distribution of unlimited alluvial rivers, compared with taiga landscapes. There is also a low proportion of orographic low-flows channels in permafrost conditions. Orographic flood channels are not typical of landscapes of Eastern European groups and are found in Siberian landscape groups, which is explained by the combined influence of limiting conditions and types of permafrost. There is an increase in limited alluvial channels from Arctic tundra landscapes to landscapes to those of taiga groups. As a result of the assessment, it is shown that the shape of riverbeds is influenced by permafrost, determining the nature of riverbed formation in the region.

Keywords: Arctic zone, channel process, channel science, hydromorphological theory, meandering, permafrost

For citation: Baskakova A.I. Using the theory of landscape studies to assess the distribution of different types of riverbeds in the Arctic zone. *Arctic and Antarctic Research*. 2024;70(2):174–184. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-2-174-184>

Received 02.04.2024

Revised 08.04.2024

Accepted 17.05.2024

Введение

При проведении на территории Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ) хозяйственных мероприятий в рамках оценки русловых процессов важно грамотно учитывать динамику речных преобразований.

Форма русловых макроформ является продуктом локальных условий, и в различных регионах русловые формы и русловой рельеф создают закономерные сочетания, благодаря которым типы речных русел имеют определенную зональность. На реки региона также оказывает уникальное влияние многолетняя мерзлота, имеющая неравномерное распространение. Развитие представлений о зональных особенностях, влияющих на речные русла, необходимо для понимания особенностей руслоформирования в регионе Арктической зоны и дальнейшего освоения региона.

Карты типов русловых процессов территорий Арктической зоны ранее публиковались в Ресурсах поверхностных вод СССР¹.

Широко известна карта русловых процессов на реках СССР, составленная МГУ в 1989 г. и показывающая типы русловых процессов преимущественно на крупных реках. Также в ВСН 163-83 и СТО ГУ ГГИ 08.29-2009 публиковались схемы распределения основных типов русловых процессов, основанные на гидроморфоло-

¹ Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 3. Северный край. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 663 с.; Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 17. Лено-Инди́гирский район. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 645 с.

гической типизации. Специалистами МГУ публиковалась схема распространения морфодинамических типов русел больших рек для территории Севера Европейской территории России (ЕТР) [4]. Русловой процесс на реках полуострова Ямал изучался ранее в работах [5, 6], а также в работах В.А. Савицкого². Ф.Э. Арэ занимался изучением динамики береговых форм в условиях многолетней мерзлоты [7, 8]. Однако слабо изучена взаимосвязь между ландшафтами и типами русел рек, а также влияние многолетней мерзлоты на русловые типы.

В зарубежной практике вопросами форм речных русел занимались специалисты Геологической службы США [9, 10], в последние годы зарубежными специалистами публикуется особенно много работ, в которых изучаются русловые процессы рек на территории многолетней мерзлоты в условиях изменения климата [11, 12]. Современная оценка влияния многолетнемерзлых грунтов на форму меандрирующих рек описана в [12]. На тему оценки скоростей русловых деформаций, в том числе в условиях многолетней мерзлоты, за последние годы также опубликовано множество работ [13–15].

Целью настоящей статьи является оценка влияния различных ландшафтных районов и мерзлотных условий на типы речных русел АЗРФ и их распределение.

Исходные данные и методики исследований

В качестве объекта исследований выбраны материковые территории 5 регионов Арктической зоны — Ненецкий автономный округ (НАО), Ямало-Ненецкий автономный округ (ЯНАО), арктические территории Республики Коми, Красноярского края и Якутии.

Особенность рассматриваемых регионов — повсеместное распространение многолетнемерзлых пород (ММП), с общим увеличением глубины промерзания с запада на восток и с севера на юг. Для рассматриваемых территорий сплошная мерзлота характерна для Якутии, полуострова Таймыр и северо-восточной половины Эвенкийского района. Мерзлота с тальми грунтами распространена в ЯНАО, на север от широты устья Оби и на северо-восточной половине НАО. Южнее на территории распространена мерзлота островного характера.

В основу выделения однородных районов положено районирование, представленное в трудах А.Г. Исаченко и А.А. Шляпникова [17, 18], базирующееся на ландшафтно-географическом подходе.

Выделенные ландшафтные группы расположены в различных мерзлотных условиях. На территориях восточноевропейских лесотундровых и северотаежных ландшафтов, а также западносибирских северотаежных ландшафтов мерзлота имеет неустойчивый характер и распространена не повсеместно. Северные тундровые ландшафты распространены в зоне сплошной мерзлоты (на восток от Ямала) и мерзлоты с тальми грунтами (Ямал, северо-восток НАО), сибирские лесотундровые и восточносибирские северотаежные ландшафты расположены в зоне сплошной мерзлоты.

В рамках настоящей работы для оценки распределения различных типов русел рек был произведен анализ русел средних рек Арктической зоны. Средние реки — реки с площадью водосбора от 2000 км² до 50000 км², протекающие в одной гидрографической зоне и наилучшим образом способные описать условия района,

² В.А. Савицкий. Плановые деформации свободно меандрирующих рек Ямала. Автореф. дис. ... канд. тех. наук. СПб.: 1996. 24 с.

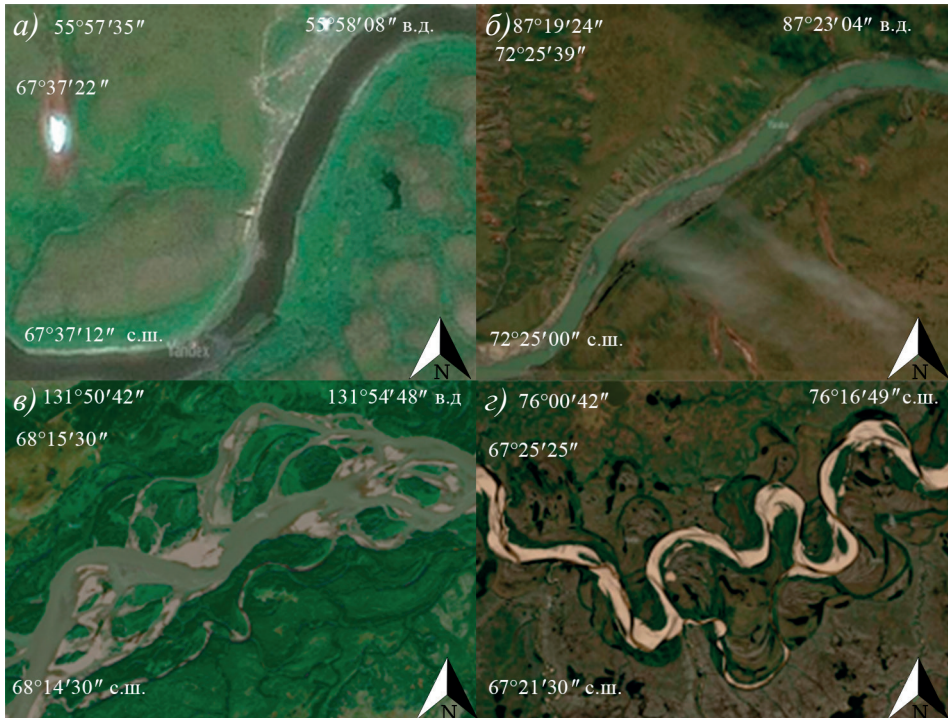


Рис. 1. Гидроморфологические типы речных русел:

а — орографическое меженное русло; б — орографическое паводочное русло; в — русло с поймой с ограничивающим влиянием склонов долины; з — русло с неограниченным развитием пойменных массивов

Fig. 1. Hydromorphological types of river channels:

а — orographic low-water channel; б — orographic flood channel; в — channel with a floodplain with the limiting influence of the valley slopes; з — channel with unlimited development of floodplain areas

поскольку, в отличие от малых рек, они меньше подвержены влиянию местных факторов и, в отличие от больших рек, отражают морфологические условия конкретного района без учета внешнего влияния на их режим.

Типы речных русел определены в соответствии с гидроморфологической типизацией речных русел в районе распространения многолетнемерзлых грунтов, опубликованной в СП 493.1325800.2020, Приложение Л, Таблица Л.1 (рис. 1). Данная классификация является развитием гидроморфологической теории руслового процесса, разработанной сотрудниками Государственного гидрологического института, с учетом орографических типов речных русел, широко распространенных на территории Арктической зоны РФ. Согласно данной классификации, тип речного русла создает условия для развития определенных русловых процессов.

В соответствии с принятой классификацией, к орографическим меженным руслам относятся русла, форма которых полностью зависит от формы долины в маловодный период года. Для русел данного типа не характерна пойма, русловые процессы полностью зависят от переформирований окружающих ландшафтов и не зависят от деятельности самой реки.

Орографические паводочные русла приобретают форму окружающего рельефа только в многоводную фазу водности, форма русла в меженный период формируется благодаря деятельности самого потока и зависит от мезоформ (побочней, крупных грядобразных скоплений [2, с. 22]), сложенных наносами. Русловые процессы в данных руслах протекают по ленточно-грядовому, побочневому и осередковому типам.

Русла с поймой с ограничивающим влиянием склонов долины обладают простейшей аллювиальной поймой, развивающейся в условиях ограничивающего влияния склонов долины. Однорукавные русла развиваются по типу руслового процесса «ограниченное меандрирование», развитие многорукавных русел происходит по типу руслового процесса «русловая многорукавность».

Русла с неограниченным развитием пойменных массивов формируются в условиях большого скопления аллювия вне влияния ограничений склонов долины. Для русел данного типа русловые процессы протекают по сценарию свободного меандрирования для однорукавных русел и по типу пойменной многорукавности для разветвленных русел.

Типизация речных русел, изложенная в СП 493.1325800.2020, таблица Л.1, также включает орографические типы русел, расположенные в унаследованных аллювиальных отложениях и сформированные на заболоченном дне долины. В данной работе они не рассматриваются, так как в процессе определения типов речных русел для изучаемых рек данные типы не были обнаружены.

Классифицирование типов речных русел произведено с использованием космических снимков. Для определения типов русел использованы данные гибридных снимков Google и Яндекс с минимальным разрешением 1 пиксель на 30 м. Определение типов речных русел произведено для 169 рек с общей протяженностью исследуемых участков 43868 км.

Результаты и обсуждение

Для оценки распространения различных гидроморфологических типов речных русел составлена карта-схема для изучаемой территории Арктической зоны РФ, представленная на рис. 2.

Цветовым фоном отображены ландшафтные районы, соответствующие группам: тундровой и лесотундровой (см. рис. 2, № 1–5) и таежной (см. рис. 2, № 6–11). Цветными полилиниями показаны типы русел изучаемых средних рек.

Тундровые и лесотундровые ландшафты характерны для северных территорий материковой части России: территории Ненецкого АО и северной части Республики Коми, полуостровов Ямал, Гыдан и Таймыр, а также территории Красноярского края севернее 66–68° с. ш. и севера Якутии. Им присущи распространение поверхностных льдов, слабая теплообеспеченность и тундровая растительность.

Речная сеть здесь достаточно развита и представлена малыми и средними реками, устьями больших рек, а также термокарстовыми озерами, образованными в результате просадки грунта.

Режим стока наносов, определяющих русловые формы, зависит от динамики промерзания-оттаивания многолетнемерзлых пород, различной для мерзлоты разных типов. При малых периодах оттаивания продолжительность вымывания аллювия из русла ограничена. Одновременно с этим мерзлотные породы в условиях достаточного увлажнения обладают текучими свойствами, влияя на выравнивание рельефа

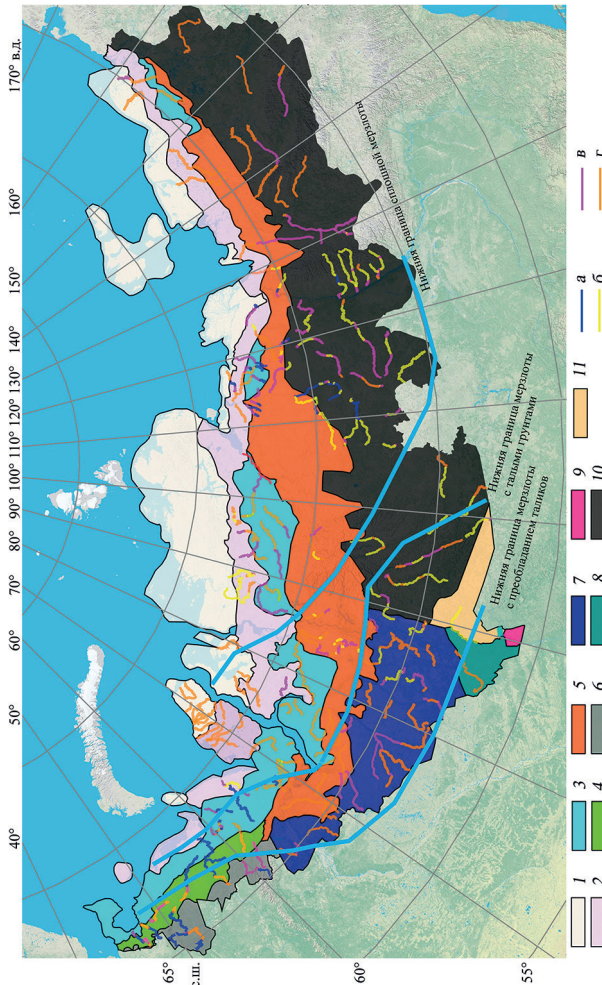


Рис. 2. Карта распространения гидроморфологических типов русел средних рек на территориях ландшафтных районов в границах исследуемых районов Арктической зоны РФ.

a — орографические межечные русла; *b* — русла с поймой с ограничивающим влиянием склонов долины; *2* — русла с неограниченным развитием пойменных массивов; *1* — арктундровые ландшафты; *2* — европейские и сибирские типичные тундровые ландшафты; *3* — европейские и сибирские южные тундровые ландшафты; *4* — восточноевропейские лесотундровые ландшафты; *5* — сибирские лесотундровые ландшафты; *6* — восточносибирские северотаежные ландшафты; *7* — западносибирские северотаежные ландшафты; *8* — западносибирские среднетаежные ландшафты; *9* — западносибирские южнотаежные ландшафты; *10* — восточносибирские северотаежные ландшафты; *11* — восточносибирские среднетаежные ландшафты

Fig. 2. A map of the distribution of hydromorphological types of medium-sized riverbeds in the territories of homogeneous landscape areas within the boundaries of the areas of the Russian Arctic zone studied

a — orographic low-flows channels; *b* — floodplain channels with limiting influence of valley slopes; *2* — riverbed with unlimited development of floodplain massifs; *1* — Arctic tundra landscapes; *2* — European and Siberian typical tundra landscapes; *3* — European and Siberian southern tundra landscapes; *4* — Eastern European forest tundra landscapes; *5* — Siberian forest tundra landscapes; *6* — North Taiga Eastern European landscapes; *7* — North Taiga West Siberian landscapes; *8* — Middle Taiga West Siberian landscapes; *9* — South Taiga West Siberian landscapes; *10* — North Taiga East Siberian landscapes; *11* — Middle Taiga East Siberian landscapes.

территории. В условиях низменных равнинных ландшафтов с малыми уклонами, характерных для тундровой части Арктической зоны, создаются условия для накопления наносов.

Соответственно, в условиях малого распространения мерзлоты наблюдается обратная картина. Свойства мерзлотных грунтов в зоне несплошной мерзлоты ослабевают, отдавая главенствующую роль в руслоформировании орографии.

Типы русел в границах однородных ландшафтов распространены неравномерно. При оценке рис. 2 стоит отметить низкую долю неограниченных русел и преобладание русел орографического меженного типа на территории ЕТР, преобладание неограниченных русел на территории полуострова Ямал и арктундровых ландшафтов в целом, а также выраженную группу орографических паводочных русел и распространение аллювиальных русел в условиях ограничения склонов долины на территории Гыданского полуострова.

В целом для территории распространения тундровых и лесотундровых ландшафтов характерно преобладание русел, сформированных вне распространения ограничивающих условий (табл. 1). Исключением выступают русла рек, протекающих в восточноевропейских лесотундровых ландшафтах, здесь преобладают орографические меженные русла, доля которых составила 48 %.

Таблица 1

**Распределение гидроморфологических типов речных русел
на территории тундровых и лесотундровых ландшафтов, в % от общего числа**

Table 1

**Distribution of hydromorphological types of river channels
in the tundra and forest-tundra landscapes, as a percentage of the total**

Тип ландшафта	Общая длина русел, км	Тип русла, в % от общего числа			
		Орографическое меженное	Орографическое паводочное	Русла с аллювиальной поймой с ограничивающим влиянием склонов долины	Русло с аллювиальными поймами вне ограничивающих факторов
Арктундровые	2992	1	5	4	90
Европейские и сибирские тундровые	5534	3	12	10	75
Европейские и сибирские южные тундровые	6617	5	3	13	79
Восточноевропейские лесотундровые	3051	48	0	20	32
Сибирские лесотундровые	7219	5	12	20	63

С продвижением от северных районов к южным в границах лесотундровых ландшафтов наблюдается общий рост доли типов русел «орографические паводочные» и «русла с поймами в условиях ограничения склонами долины», за исключением территории восточноевропейских лесотундровых ландшафтов, для которых доля орографических паводочных русел составила менее 1 % при значительной доле аллювиальных ограниченных русел (20 %) (табл. 1).

Таежные и подтаежные ландшафты распространены вдоль южной границы Арктической зоны. Для тайги характерна сезонная контрастность температур с длительной зимой и умеренным теплым летом и избыточное увлажнение. На территории данных ландшафтов, в отличие от тундровых и лесотундровых ландшафтов, нет преобладающего типа речных русел (табл. 2).

Как и на тундровых территориях, типы речных русел в тайге весьма разнообразны. В целом отмечается увеличение доли неограниченных русел с запада на восток.

Территории таежных ландшафтов в меньшей степени подвержены влиянию океана, практически повсеместно расположены в зоне резко континентального климата и недостаточно увлажнены. Ввиду малого увлажнения многолетнемерзлые породы обладают меньшей пластичностью, что выражается в большем влиянии орографии на руслоформирование.

Таблица 2

Распределение гидроморфологических типов речных русел на территории таежных и подтаежных ландшафтов, в % от общего числа

Table 2

Distribution of hydromorphological types of river channels in the territory of taiga and subtaiga landscapes, as a percentage of the total

Тип ландшафта	Общая длина русел, км	Тип русла, в % от общего числа			
		Орографическое межечное	Орографическое паводочное	Русла с аллювиальной поймой с ограничивающим влиянием склонов долины	Русло с аллювиальными поймами вне ограничивающих факторов
Восточноевропейские северотаежные	1227	51	0	29	20
Западносибирские северотаежные	6065	1	10	29	60
Восточносибирские северотаежные	11635	5	39	27	29

Примечание. Гидрография западносибирских и восточносибирских среднетаежных ландшафтов включает по 2 % участков рек по протяженности от общего числа. Средние реки на территории западносибирских южнотаежных ландшафтов отсутствуют. Распределение типов речных русел в данных группах ландшафтов далее не оценивается ввиду малой протяженности русел рек.

Note. The hydrography of West Siberian and East Siberian Middle Taiga landscapes includes 2% of the river sections by length of the total number. There are no middle rivers on the territory of Western Siberian southern taiga landscapes. The distribution of riverbed types in these landscape groups is not further evaluated due to the small length of the riverbeds.

На территориях распространения восточноевропейских северотаежных ландшафтов отмечается наибольшее распространение орографических меженных русел, их доля составила 51 %. Доля орографических паводочных русел на данных ландшафтах не превышает 1 %.

Восточнее Урала на территории восточносибирских северотаежных районов, в отличие от аналогичных европейских ландшафтов, отмечается понижение доли орографических меженных русел, развивающихся в условиях узкой долины. Для данных территорий наиболее характерно развитие орографических паводочных русел, доля которых составляет 39 %. Доли ограниченных и неограниченных аллювиальных русел примерно равны и составляют 27 % и 29 % соответственно.

На западносибирских северотаежных ландшафтах, простирающихся на юге ЯНАО и охватывающих низовья Оби и Енисея, отмечается слабое влияние орографии на руслоформирование. Наиболее высокая доля отмечается у неограниченных типов русел — 60 %. Аллювиальные ограниченные русла составляют 29 % от общего числа. Доля орографических паводочных русел на рассматриваемых ландшафтах составляет 10 %, орографические меженные русла практически не встречаются и составляют 1 %.

Заключение

В настоящей статье представлены результаты анализа гидроморфологических типов русел средних рек, протекающих на территории Ненецкого АО, Республики Коми, ЯНАО, Красноярского края и Якутии в границах Арктической зоны РФ.

Анализ показал, что:

– Для тундровых ландшафтов, по сравнению с таежными ландшафтами, отмечается большее распространение русел рек, формирующихся в собственных аллювиальных отложениях вне влияния орографии. Также отмечено, что доля указанных русел возрастает с продвижением на север. Это можно объяснить несколькими причинами. Во-первых, северные тундровые территории занимают преимущественно равнины, на которых орография слабо развита. Во-вторых, это можно объяснить с точки зрения благоприятных условий для накопления наносов в руслах северных тундровых рек. Благодаря суровым климатическим условиям и распространению сплошной мерзлоты и мерзлоты с талыми грунтами в непродолжительный период оттаивания ММП, в период половодья в речные русла приходит большое количество наносов, которые не успевают пройти вниз по течению и задерживаются в речной долине в последующий период межени.

– Сравнительно мала доля орографических меженных русел в зонах распространения сплошной мерзлоты. Наиболее широкое распространение орографических русел отмечается в восточноевропейских лесотундровых ландшафтах (48 %) и восточноевропейских северотаежных ландшафтах (51 %), распространенных на территории ЕТР в зоне несплошной мерзлоты. Это можно объяснить тем, что при отсутствии сплошной мерзлоты условия для задержки твердого стока отсутствуют и наносы не успевают создать мезо- и макроформы, проходя транзитом до впадения реки в море.

– Орографические паводочные русла не характерны для восточноевропейских лесотундровых ландшафтов и восточноевропейских северотаежных ландшафтов, для обеих групп ландшафтов их доля не превышает 1 %. При этом орографические паводочные русла распространены в таежных сибирских ландшафтах, являясь преобладающим типом для восточносибирских таежных ландшафтов. Эта тенденция объясняется совокупным влиянием мерзлоты и ограничивающих условий на формы русел рек.

В отличие от аналогичных долин на Европейской территории, в сибирских долинах территории сплошной мерзлоты созданы условия для накопления наносов.

– Отмечается тенденция к росту доли аллювиальных ограниченных русел от арктундровых ландшафтов до среднетаежных ландшафтов. Руслу рек данного типа встречаются повсеместно на всех ландшафтных группах.

Анализ распространения типов речных русел в различных ландшафтных и мерзлотных районах показал, что в Арктической зоне на тип речного русла оказывают определяющее совокупное влияние мерзлотные условия и орография, которые обуславливают руслоформирование и режим наносов. Показано, что учет характера мерзлоты необходим при дальнейшей оценке русел рек региона.

Конфликт интересов. Автор статьи заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Работа выполнена в период обучения в аспирантуре Государственного гидрологического института.

Благодарности. Автор выражает благодарность Н.И. Горошковой за ценные советы об особенностях криолитозоны, Д.И. Исаеву за предложенную методику полигонов для определения характерных параметров речных излучин, а также научному руководителю В.М. Католикову за ценные советы в области русловых процессов. Также автор выражает благодарность рецензентам и редакционной коллегии журнала Проблемы Арктики и Антарктики, которые внесли большой вклад в создание настоящей статьи.

Competing interests. The authors declare no conflict of interests.

Funding. The work was carried out during postgraduate studies at the State Hydrological Institute.

Acknowledgments. The author expresses gratitude to N.I. Goroshkova for valuable advice on the features of the permafrost zone, D.I. Isaev for the proposed method of polygons for determining the characteristic parameters of river bends and, last but not least, to the research supervisor V.M. Katolikov for valuable advice in the field of channel processes. The author also expresses gratitude to the reviewers and the editorial board of the journal Arctic and Antarctic Research, who made a great contribution to the publication of this article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Noe G., Hopkins K., Claggett P., Schenk E., Metes M., Ahmed L., Doody T., Hupp C. Streambank and floodplain geomorphic change and contribution to watershed material budgets. *Environmental research letters*. 2022;17(6):064015. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac6e47>
2. Кондратьев Н.Е., Попов И.В., Смищенко Б.Ф. *Основы гидроморфологической теории руслового процесса*. Л.: Гидрометеиздат; 1982. 272 с.
3. Попов И. В. *Методологические основы гидроморфологической теории руслового процесса. Избранные труды*. СПб.: Нестор-История; 2012. 304 с.
4. Львовская Е.А., Чалов Р.С. Морфодинамика русел больших рек Севера ЕТР и прогнозные оценки ее изменений. *Геоморфология*. 2018;3:3–23. <https://doi.org/10.7868/S043542811803001X>
Lvovskaya E.A., Chalov R.S. River channel hydromorphology in the northern part of the European territory of Russia and prognostic evaluation of their changes. *Geomorfologiya*. 2018;(3):3–23. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S043542811803001X>
5. Исаев Д.И., Иванова О.И., Баскакова А.И. Методика описания речных излучин (на примере рек Ямала). *Гидрометеорология и экология*. 2021;63:227–235. <https://doi.org/10.33933/2713-3001-2021-63-227-235>

- Isaev D.I., Ivanova O.I., Baskakova A.I. Procedure for describing river meanders. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology (Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University)*. 2021;63:227–235. (In Russ.). <https://doi.org/10.33933/2713-3001-2021-63-227-235>
6. Исаев Д. И. Русловой процесс рек Ямала. В сборнике: *География: развитие науки и образования. Сборник статей по материалам ежегодной международной научно-практической конференции LXXIV Герценовские чтения. Т.1*. Отв. редакторы С.И. Богданов, Д.А. Субетто, А.Н. Паранина. СПб.: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена; 2021:258–261.
 7. Арэ Ф.Э. *Основы прогноза термоабразии берегов*. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение; 1985. 176 с.
 8. Арэ Ф.Э. Новые данные о динамике береговой зоны западного побережья дельты реки Лены. В: *Материалы международной конференции «Криосфера Земли как среда жизнеобеспечения»*. Пушино-на-Оке: Пушинский научный центр РАН; 2003. С. 234–235.
 9. Leopold L., Wolman M. River meanders. *Bulletin of the Geological Society of America*. 1960;71:769–794.
 10. Langbein W., Leopold L. River meanders — Theory of minimum variance. *Geological Survey Professional Paper 422-H*. Washington, D.C.: U.S. Government Printing office; 1966. 422H: H1–H15. <https://doi.org/10.3133/pp422H>
 11. Treat C., Jones M., Alder J., Frolking S. Hydrologic controls on peat permafrost and carbon processes: new insights from past and future modeling. *Frontiers Environmental Science*. 2022;10:892925. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.892925>
 12. Levy J., Cvijanovic B. Meandering river evolution in an unvegetated permafrost environment. *Geomorphology*. 2023;432:108705 <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108705>
 13. Rowland J.C., Schwenk J.P., Shelef E., Muss J., Ahrens D., Stauffer S., Pilliouras A., Crosby B., Chadwick A., Douglas M.M., Kemeny P.C., Lamb M.P., Li G.K., Vulis L. Scale-dependent influence of permafrost on riverbank erosion rates. *JGR Earth Surface*. 2023;128(7): e2023JF007101. <https://doi.org/10.1029/2023JF007101>
 14. Douglas M.M., Miller K.L., Schmeer M.N., Lamb M.P. Ablation-limited erosion rates of permafrost riverbanks. *JGR Earth Surface*. 2023;128(8):e2023JF007098. <https://doi.org/10.1029/2023JF007098>
 15. Langhorst T., Pavelsky T. Global observations of riverbank erosion and accretion from landsat imagery. *JGR Earth Surface*. 2023;128(2): e2022JF006774. <https://doi.org/10.1029/2022JF006774>
 16. Раковская Э. М., Давыдова М. И. *Физическая география России. Часть 1. Общий обзор. Европейская часть и островная Арктика*. М.: Владос; 2001. 288 с.
 17. Исаченко А. Г. Глобальная система ландшафтных макрорегионов. *Известия Русского географического общества*. 2007;139(1):3–18.
 18. Исаченко А. Г., Шляпников А. А. *Природа мира: Ландшафты*. М.: Мысль; 1989. 504 с.

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-2-185-209>

УДК [556.166:627.51+556.167.6+551.465.75]:556.54(282.247.11)



Гидрологические опасности в устье Печоры¹

Д.В. Магрицкий¹✉, С.А. Агафонова¹, Л.С. Банщикова²,
К.И. Головнин^{1,3}, Л.Ю. Севастьянова⁴,
А.Э. Сумачев⁵

¹ *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

² *Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург, Россия*

³ *Институт водных проблем РАН, Москва, Россия*

⁴ *ФКУ «Гидрометсервис», Москва, Россия*

⁵ *Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*

✉ magdima@yandex.ru

 ДВМ, 0000-0002-4953-8376; САА, 0000-0002-6392-1662; ЛСБ, 0000-0002-5878-1458;
КИГ, 0009-0001-9551-8755; ЛЮС, 0009-0004-5149-0588

Аннотация. В статье приведены результаты анализа характеристик опасных гидрологических явлений и процессов на устьевом участке р. Печоры. В качестве исходных данных использовались материалы наблюдений на гидрологических постах, сведения о произошедших наводнениях и опасных обмелениях, спутниковые снимки. Установлено, что основной ущерб в пределах исследуемого участка создают наводнения стокового и стоково-заторного генезиса. Определено наиболее опасное время образования заторов льда и развития наводнений. Обоснованы связи между уровнями воды и площадью затопления, между максимальными уровнями и продолжительностью затопления. Выделены 4 основных сценария вскрытия Печоры и дельтовых рукавов весной.

Ключевые слова: дельта, затопление, затор льда, обмеление, опасное явление, пост, река, спутниковый снимок, уровень воды

Для цитирования: Магрицкий Д.В., Агафонова С.А., Банщикова Л.С., Головнин К.И., Севастьянова Л.Ю., Сумачев А.Э. Гидрологические опасности в устье Печоры. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2024;70(2):185–209. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-2-185-209>

Поступила 29.04.2024

После переработки 17.06.2024

Принята 18.06.2024

¹ Статья подготовлена на основе доклада «Опасные гидрологические явления на устьевом участке р. Печора», представленного на 2-й Международной научно-практической конференции в г. Астрахань 18 мая 2023 г. [34].

Hydrological hazards at the mouth of the Pechora River

Dmitry V. Magritsky¹✉, Svetlana A. Agafonova¹, Lyuba S. Banshchikova²,
Kirill I. Golovnin^{1,3}, Lyudmila Yu. Sevastyanova⁴, Alexander E. Sumachev⁵

¹ *Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

² *State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia*

³ *Water Problems Institute RAS, Moscow, Russia*

⁴ *Hydrometservice, Moscow, Russia*

⁵ *Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia*

✉magdima@yandex.ru

 DVM, 0000-0002-4953-8376; SAA, 0000-0002-6392-1662; LSB, 0000-0002-5878-1458; KIG, 0009-0001-9551-8755; LYS, 0009-0004-5149-0588

Abstract. The paper presents the results of a comprehensive analysis of the situation with dangerous hydrological processes at the mouth reaches of the Pechora River (from the mouth of the Sula River to the Pechora Bay). The study used data from observations of water levels, discharges and ice phenomena at hydrological gauges (until 2022), information about inundations and adverse shallowing that occurred here, satellite images (since 1991). It was found that the main damage in the mouth of the Pechora River is caused by river inundations, one of the main factors of which is ice dams. It has also been established that the long-term repeatability of the ice-dam formation is actually greater than the gauge observation shows. During the spring flood, the floodplain is flooded almost annually, and in 25–50 and 10–14 % of years the water level exceeded the adverse and dangerous values. The city of Naryan-Mar often suffers from floods. Until the 1970s, these occurred almost every other year; more recently, there were major inundations in 1998, 2008, 2014 and 2017. The most dangerous season for the formation of ice dams and the occurrence of inundations has been determined. On a long-term scale, the frequency of flooding and ice-dam formation has remained practically unchanged, the duration of floodplain flooding has increased everywhere, whereas the time of the water level exceeding the adverse mark has increased in the river mouth segment upstream from the delta and decreased in the delta. The empirical dependencies between the water levels and the area of flooding, between maximum water levels and the duration of flooding are substantiated. There are four main scenarios of the channel of the Pechora River and delta branches opening from the ice cover in spring. The location of the main points of ice-dam formation has been specified. The third unfavorable hydrological process within the Pechora River mouth is adverse water runoff shallowing, which disrupts river navigation. In the vast majority of cases, it is associated not with low water levels in the delta, but with those in the middle and lower reaches of the Pechora River. This period lasts from August 11 to September 6. On a long-term scale, the situation with minimum levels in the summer and autumn season has improved. As regards other unfavorable hydrological phenomena — anomalous (by date) ice formation, sea-water intrusion into the delta branches, storm surges and wind-induced down-surges — it has been found that they do not cause damage either because of their low intensity and repeatability, or because they belong to other parts of the Pechora mouth region.

Keywords: adverse shallowing, dangerous phenomenon, delta, flooding, gauge, ice dam, river, satellite image, water level

For citation: Magritsky D.V., Agafonova S.A., Banshchikova L.S., Golovnin K.I., Sevastyanova L.Yu., Sumachev A.E. Hydrological hazards at the mouth of the Pechora River. *Arctic and Antarctic Research*. 2024;70(2):185–209. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-2-185-209>

Received 29.04.2024

Revised 17.06.2024

Accepted 18.06.2024

Введение

В устьях рек перечень опасных гидрологических процессов и явлений, их повторяемость и интенсивность нередко выше, чем в бассейнах рек и на типичных морских побережьях. Причин такой ситуации несколько: от уникальности расположения, особенностей морфологического и гидрографического строения, гидрологического режима устьев рек, активного взаимодействия здесь речных и морских гидрометеорологических факторов до высокой их хозяйственной освоенности и плотности заселения, ценности и уязвимости устьевых экосистем [1]. Арктические речные устья не исключение, хотя здесь не все опасные гидрологические явления (ОГЯ) имеют такую же интенсивность и пространственный охват, как в южных широтах, да и степень хозяйственного освоения меньше. Тем не менее к таким объектам можно уверенно отнести устье р. Печоры, где г. Нарьян-Мар не раз подвергался затоплениям речными водами [2, 3].

Перечень ОГЯ в устьевой области Печоры не ограничивается лишь речными наводнениями. Помимо них опасность представляют штормовое волнение и нагонные затопления, стоквые обмеления в реке и дельтовых рукавах, интенсивный ледоход, заторы льда, дрейф морских льдов и навалы льда, аномальное по срокам ледообразование, проникновение морских вод в дельтовые рукава и др., в соответствии с понятийным аппаратом и классификацией из [1, 4]. Причем из-за климатических изменений, характерной реакции на них морского уровня и ледовых условий, штормовой активности, стока и гидрологического режима р. Печоры, расширения природопользования интенсивность этих явлений лишь усиливается.

Целостному пониманию этой проблемы препятствует слабое информационное обеспечение. Собираемые на мониторинговой сети гидрологические данные имеют пространственное ограничение. По сути, сами пункты, расположенные на реке и главных рукавах, дают представление лишь о том, что происходит на небольшом участке поста, тогда как экспедиционные исследования, способные охватить больше территорий и водных объектов, практически не проводятся. Кроме того, материалы стационарных наблюдений публикуются в специализированных справочниках, доступ к которым затруднен даже для специалистов. Все это сужает возможности полноценного анализа современной ситуации с ОГЯ в устье Печоры по выявлению факторов их развития, причинно-следственных связей и в итоге по внедрению и совершенствованию мер, снижающих частоту и масштабы ОГЯ, генерируемые ими ущербы.

В первых работах с разделами по ОГЯ в устье Печоры [5, 6] основное внимание уделено заторам льда и заторным наводнениям, а также проникновению соленых вод в рукава дельты по материалам экспедиции 1977 г. В 2001 и 2007 гг., в новых исследованиях сотрудников ГОИНа [7, 8], анализируются причины возникновения и механизмы развития заторов льда. На современном этапе изучения ОГЯ, обусловленных ледовыми явлениями, заторными уровнями воды и разливами речных вод, приводятся оценки характеристик соответствующих ОГЯ, новые подходы в прогнозировании и выявлении самих заторов [9–13]. Важные дополнительные сведения по наблюдавшимся в устье р. Печоры наводнениям и опасным повышением уровня содержатся в [3, 14]. В работах [15, 16], по результатам расчетов и гидродинамического моделирования, демонстрируются карты районов дельтовой равнины и заселенных территорий, потенциально подверженных затоплению речными водами. В перечне подобных работ выделяется публикация [2], в которой впервые рассмотрены все

основные ОГЯ в устье Печоры с указанием особенностей их временной изменчивости, участков проявления и величин основных характеристик. С учетом новых данных, получаемых как со стационарной сети, так и со спутниковых аппаратов, произошедших изменений в водном и ледовом режиме реки и приемного водоема, появления новых методик выявления заторов льда и научно-исследовательских результатов (в том числе от других исследователей) назрела необходимость нового обобщения всей информации по ОГЯ в устье Печоры, более детализированного понимания современной ситуации с ними, ее структурных и многолетних изменений, основных причин этого процесса, эффективности реализуемых мероприятий. Такой посыл определил цель и задачи проведенного исследования, добавил новые решения, основанные на сопоставлении материалов наземного и спутникового мониторинга, на сравнительном анализе весеннего хода уровня воды и ледовых условий на всех постах по длине устьевых участков Печоры, на новых данных от ОГМС Нарьян-Мар, муниципальных органов и местного населения.

Данные и методики

В качестве исходных материалов при решении задач исследования были использованы прежде всего данные наземных гидрологических наблюдений (за уровнями (H) и расходами (Q) воды, ледовыми явлениями) на гидрологических постах в пределах устьевых участков р. Печоры за весь период и вплоть до 2021–2022 гг., а также опубликованные материалы экспедиционных гидрологических изысканий.

Устьевой участок Печоры начинается от устья р. Сулы, куда могут проникать со стороны моря нагонные колебания уровня [17], и заканчивается морским краем дельты. Его длина 190 км; он включает придельтовую часть (от верхней (речной) границы устьевых участков до вершины дельты) и дельту площадью 3250 км² (рис. 1). Выше дельты Печора имеет широкую пойму с многочисленными протоками и озерами, разветвленное русло. Здесь река разделяется на Малую Печору и Большую Печору, которые сливаются выше с. Оксина, вновь образуя единое русло. В вершине дельты, у с. Большая Сопка и в 120 км от Печорской губы, река разделяется на дельтовые рукава Большая Печора (правый) и Малая Печора (левый). Малая Печора разделяется на несколько крупных и множество небольших рукавов. Большая Печора (основной рукав) имеет широкое, но извилистое, с несколькими разветвлениями русло и основной узел бифуркации недалеко от Печорской губы. В дельте множество озер (самое большое — оз. Голодная Губа) и болот; на долю суши в межень приходится ~70 % [5]. Преобладающие высоты над уровнем моря — от 1 до 6 м, максимальные высотные отметки 7 м БС; правый и левый берега высокие — до 20–50 м БС. Ландшафтный облик устьевых участков мало изменен человеком. В устье главный населенный пункт, морской и речной порт — это город Нарьян-Мар (23,6 тыс. чел.). Еще ~2 тыс. чел. проживает в менее чем десяти сельских поселениях.

На устьевом участке основной стоковый пост — это ГП-1 Оксина, который замыкает водосбор площадью 312 000 км² и расположен в 141 км от устьевых створов рук. Большая Печора (мыса Болванский Нос) (см. рис. 1). Он функционирует с 1916 г., но измерения Q на нем имеют большой перерыв с 1946 по 1979 г., а уровней — с 1964 по 1974 г. Кроме того, достоверность Q вызывает вопросы, изложенные в [18, 19]. Поэтому для понимания гидрологической обстановки в устье также используют Q на посту Усть-Цильма (248 000 км²; в 425 км). Другие посты на устьевом участке — уровенные: МГП Нарьян-Мар (100 км от залива, действует

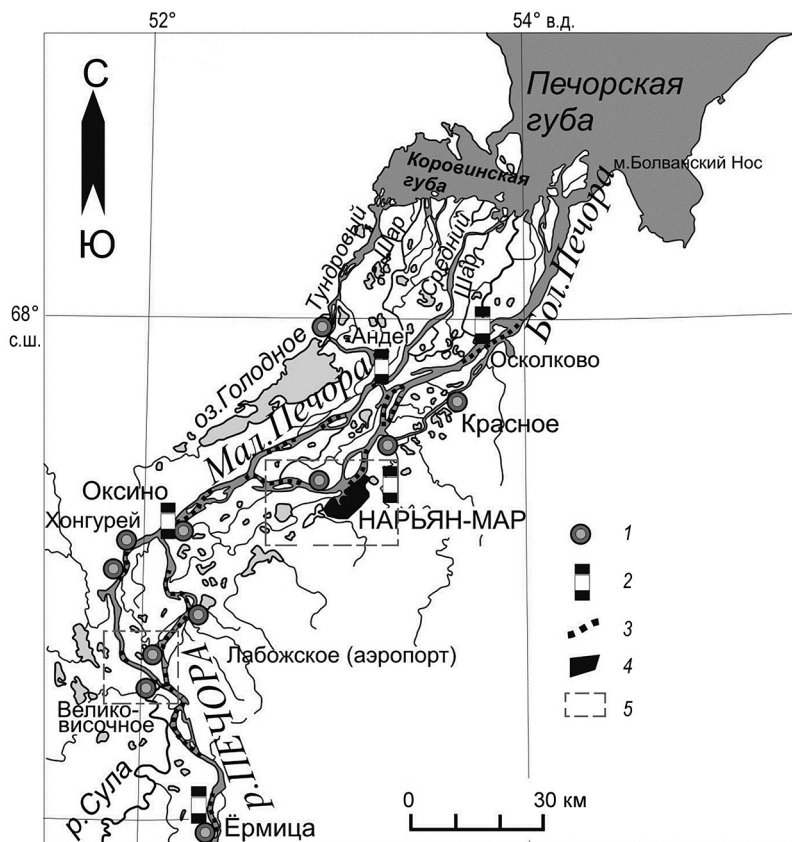


Рис. 1. Устьевой участок р. Печоры. 1 — сельские населенные пункты, 2 — гидрологические посты, 3 — участки образования заторов льда, 4 — г. Нарьян-Мар, 5 — фрагменты настоящей карты, приведенные на рис. 5, 6

Fig. 1. The mouth section of the Pechora River. 1 — rural settlements, 2 — hydrological gauges, 3 — areas of ice-dam's formation, 4 — the city of Naryan-Mar, 5 — fragments of this map shown in Fig. 5, 6

с 1927 г.), МГП-2 Андег (75 км, с 1974 г.) и МГП-2 Осколково (53 км, с 1968 г.). Пост Красное (в 62 км от моря) был закрыт в 1987 г. Использованы также данные по уровням на постах Усть-Цильма и Ермицы (в 236 км, с 1933 г.). Эти посты находятся выше верхней границы устьевое участка, однако по данным поста Усть-Цильма можно судить о параметрах летне-осеннего обмеления в низовьях Печоры, а по ГП Ермицы — о гидрологической ситуации в придельтовой части устья.

Данные наблюдений на постах брались из гидрологических справочников: с 1936 и по 1980 г. включительно — это «Гидрологический ежегодник» (Том 0. Выпуски 4, 8, 9); после 1980 г. — «Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши» (Том I. Вып. 9) и «Ежегодные данные о режиме и качестве вод морей и морских устьев» (Том 2. Том 3. Часть 1–2). Часть данных за последние годы была взята с сайта АИС ГМВО (<https://gmvo.skniivh.ru/>), а также была предоставлена Объединенной гидрометеорологической станцией «Нарьян-Мар».

Второй информационный блок составили сведения о произошедших в прошлом опасных гидрологических событиях. Основной объем таких сведений был взят из баз данных по ОГЯ в устьях рек европейской части России — «Наводнения в устьях рек Европейской территории России» (Св. о рег. № 2013620332, 21.02.2013) и «Опасные гидрологические явления на морских побережьях Европейской России» (№ 2015620918, 16.06.2015).

Третий блок — это материалы спутниковой съемки на случаи развития наводнений вблизи населенных пунктов и за период начиная с 1991 г. Были использованы снимки съемочных систем Thematic Mapper (TM) Landsat-5, Operational Land Viewer (OLI) Landsat-8, Multispectral Imager (MSI) Sentinel-2, а также снимки, полученные радиолокатором с синтезированной апертурой со спутника Sentinel-1. Источниками космических снимков послужили серверы Earth Observation System (EOS, приложение Land Viewer) (<https://eos.com/>), Earth Explorer USGS (<https://www.usgs.gov/land-resources/>). Радиолокационные снимки Sentinel-1 получены с ресурса Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu/>). Для доступа к снимкам и с целью осуществления некоторых этапов их тематической обработки также использовался ресурс Google Earth Engine. Топографической основой послужили карты масштаба 1:200000, две цифровые модели рельефа: GMTED2010 с разрешением в плане ~160 м и ArcticDEM (основная), изначально имеющая разрешение 2 м (при экспорте разрешение было понижено до 10–15 м) с сайта (<https://download.gebco.net/>).

Основными методами обработки и анализа данных стали, во-первых, стандартные гидрологические расчеты и статистические методы анализа (включая критериальный), во-вторых, построение разнообразных эмпирических зависимостей, с оценкой тесноты связи и адекватности (на базе коэффициента достоверности R^2), и хронологических графиков. Ординаты разностной интегральной кривой (St) рассчитаны по формуле $St_i = \sum_1^i (x/\bar{x} - 1)$, где x_i — значение характеристики за конкретный год; $\bar{x}$ — средняя за многолетний период величина рассматриваемой характеристики.

В-третьих, проводился сравнительный анализ данных с постов по экстремальным уровням и расходам воды, по ледовым явлениям, критических высотных отметок и документально подтвержденных событий с опасными гидрологическими явлениями. Это позволило более обоснованно скомпоновать многолетний ряд всех возможных случаев возникновения наводнений стокового и стоково-заторного генезиса, неблагоприятных стоковых обмелений и др.

В-четвертых, для оценки характерных мест образования заторов льда строились кривые отметок уровней воды (в БС) по длине устьевых участков $H = f(L, t)$, где L — расстояние от моря до поста, км; t — одномоментное время фиксации уровня на всех рассматриваемых постах, в сутках. Такие графики с изолиниями отметок в координатах времени и расстояния были построены для рукава Большая Печора по данным постов Оксина — Нарьян-Мар — Осколково и для Малой Печоры по постам Оксина — Андег за период с 1978 по 2019 г. Переломы в продольном профиле, вызванные образованием заторной «плотины», позволяли отследить сроки и место формирования заторов льда, согласно методике в [20–22].

В-пятых, по спутниковым снимкам на даты развития речных наводнений — до начала события, во время него и по окончании, строго в пределах двух полигонов: 1) вокруг населенных пунктов Великовисочное и Лабожское (площадь полигона 307 км²), 2) г. Нарьян-Мар и его окрестности, включая п. Искателей, п. Тельвиска

и д. Макарово (469 км²), — определялись границы и площадь затопленной территории с точностью 10–30 м. Обработка данных радиолокационной съемки производилась в программе SNAP Desktop (ESA's Sentinel Application Platform), а оптические снимки — с помощью Google Earth Engine и QGIS. Обязательно учитывался рельеф поймы, русловые переформирования за 1991–2020 гг. Последнее анализировалось путем сопоставления снимков за разные годы в меженный сезон. Оцененные параметры затопления (с исключением меженного водного зеркала) сопоставлялись с данными наземных гидрологических наблюдений, гидрографической сетью (в меженных границах) и рельефом территории, участками заторообразования.

Результаты и их обсуждение. Опасные ледовые явления

Первое упоминание об опасных ледовых процессах и событиях в устье Печоры датируется 1611 г., когда уже в конце лета ударили морозы, море в устье реки Печоры замерзло, на самой реке начался ледоход, повредивший установленные на сему сети и лишивший рыбаков улова [23]. В настоящее время действительно негативные эффекты на устьевом участке Печоры способны создавать заторы льда и аномальное по срокам ледообразование, прежде всего в отношении открытия и закрытия ледовых переправ.

Заторы льда в реке и дельтовых рукавах, увеличивая скорость и величину подъема уровня, формируют самые опасные и частые наводнения — стоково-заторные. Интенсивный ледоход в реке, навалы льда на берегах, прямое давление масс льда на сооружения могут создавать дополнительный ущерб. Так было по меньшей мере один раз — весной 1966 г., когда огромные массы льда во время интенсивного ледохода и из-за прорвавшихся (выше по течению) мощных заторов, сопутствующие большим расходам воды, повредили причалы и обрушили портовые краны в г. Нарьян-Маре [24].

Средние сроки вскрытия реки у с. Оксина и в дельтовых рукавах приходится соответственно на 20 и 22–24 мая (за 1991–2021 гг. — период современного гидрологического режима Печоры). Ледоход на устьевом участке проходит при высоких уровнях воды, и в 71 % случаев на посту Оксина и 87–91 % случаев на постах в дельте (Нарьян-Мар, Андег и Осколково) высшие годовые уровни наблюдались во время весенних ледовых явлений. Выше кромки ненарушенного ледяного покрова, при замедлении ледохода на участках сужения русла, крутых поворотах и выше островов образуются заторы льда. В дельте реки заторообразованию могут способствовать также нагонные ветры [2]. На рис. 1 показаны основные заторные участки.

Протяженность заторов, включая основание, гребень и массив, составляет 10–25 км [7]. В 1992 г., согласно ОГМС Нарьян-Мар и материалам авиаразведки, протяженность затора в русловом рукаве Малая Печора, с основанием между д. Каменка и п. Хонгурей, составила 40 км, т. е. больше, чем в 1979 г., когда в устье Печоры было наводнение. Подпор от заторов распространяется на десятки километров. Продолжительность заторов, по стационарным наблюдениям, варьирует от 1 до 3–5 суток и реже дольше (рис. 2). Хотя ледовые заторы относительно кратковременны, их разрушение не означает быстрое освобождение русла. При относительно маломощных и кратковременных заторах льда этот процесс последовательный и представляет собой разрушение одних заторов, смещение льда ниже по течению и формирование новых заторов либо смещение самих заторов. При порыве мощных заторов огромные массы воды и льда могут «проноситься» без повторного заторообразования вниз по течению.

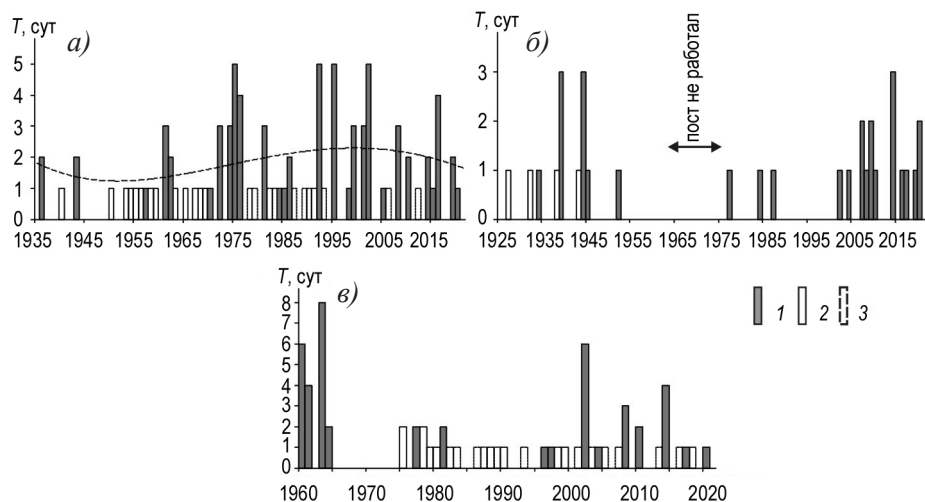


Рис. 2. Продолжительность заторов льда на участке пост Ермицы — пост Оксино (а; с линией тренда), ниже поста Оксино (б) и в дельте Печоры (в).

1 — продолжительность затора льда известна и приводится на диаграмме; 2 — из гидрологического ежегодника известно лишь о факте образования затора льда; 3 — факт образования затора льда установлен расчетным способом

Fig. 2. The duration of ice dams at the Yermitsa — Oksino reaches (a; with a trend line), downstream the Oksino gauge (b) and in the Pechora River Delta (c).

1 — the duration of ice dam is known and shown in the diagram; 2 — only the fact of ice dam formation is known; 3 — the fact of ice dam formation is established by calculation

Информация о ледовых явлениях, публикуемая в гидрологических ежегодниках, не позволяет достоверно оценить характеристики заторов льда в пределах устьевое участка Печоры. Согласно [5], заторы льда образуются здесь практически ежегодно. Если следовать данным из гидрологических ежегодников и из справочника «Характерные уровни воды»², то за 1927–1964, 1976–2021 гг. повторяемость заторов у с. Оксино (ниже створа поста) равна 27 % и примерно столько же (28 %) в дельте Печоры с 1975 по 2021 г. Ниже с. Ермицы частота заторообразования до 1970-х гг. оценена величиной в 56 % [25], а с 1936 по 2021 г. — в 45 %. Главная причина несоответствия выводам из работы [5] в следующем: небольшая протяженность участка поста и ограниченность обзора при наблюдениях с берега, нечеткость критериев в выделении затора льда. Но даже в годы, когда проводилась ледовая авиаразведка (примерно до середины 1990-х гг.), сведения о ледовых заторах не всегда есть в ежегодниках.

Дополнительные или более полные сведения о заторах льда могут быть получены посредством сравнительного анализа уровней воды на соседних постах (этим подходом, например, руководствовались авторы «Каталога заторных и зажорных участков рек СССР» [25]) или по графикам $H = f(L, t)$. В итоге проведенная авторами работа позволила установить, что за период с 1975 по 2021 г. суммарная повторяемость заторов в дельте составила 68 % (включая данные из гидрологических

² Государственный водный кадастр. Характерные уровни воды (погодичные данные). Т. 1. Вып. 8, 9. Л.: Гидрометеониздат, 1989. 271 с.

ежегодников и с учетом верхнего участка дельты ниже с. Оксина) (см. рис. 2б). Это заторы, которые либо образовались вблизи постов (располагаясь ниже по течению), либо были значительными по своей мощности и продолжительности ($\geq 1-2$ сут), формируя подпорный подъем уровня даже на постах, удаленных от головы затора. Из всех выявленных заторов в 22 % случаев заторы выше г. Нарьян-Мара — у о-вов Средний и Кермудей (см. рис. 1) — привели к значительному подъему уровня в рук. Большая Печора, заторы у о. Кисличный — в 16 % случаев, на Куйских перекатах — в 28 %. По Малой Печоре — это 27 % случаев у Чаячых островов и 53 % у о-вов Кобылий и Середовой. Для участка Ермицы — Оксина повторяемость заторов за 1936–2021 гг., с учетом дополнительных данных, составила 60 % (см. рис. 2а). Это близко к оценкам из [25], полученным не только по сведениям о заторах льда в гидрологических ежегодниках, но и при сопоставлении среднесуточных уровней на соседних постах. Тем не менее ошибки и завышение повторяемости заторообразования при использовании данного метода не исключены.

Также анализ хода уровней воды и ледовых явлений на постах в дельте позволил выделить 4 основных сценария вскрытия, которые могут быть основой при разработке мер по предотвращению негативных последствий от заторов льда:

1. Вскрытие Большой Печоры начинается раньше, чем Малой Печоры. Пока на Большой Печоре развиваются подвижки и ледоход, на Малой Печоре сохраняются закраины. В такие годы формирование заторов происходит преимущественно в рукаве Большая Печора, Малая Печора вскрывается без заторов или с кратковременными остановками (так было в 1983, 1990 и 2002 гг.).

2. Вскрытие Малой и Большой Печоры начинается одновременно, после формирования закраин и подвижек. Если голова затора устанавливается в Большой Печоре выше Андегского узла, то ледоход по Малой Печоре проходит спокойно, без образования мощных заторов (1989, 1993 гг.). Если голова затора в Большой Печоре устанавливается ниже Андегского узла, то возможно перераспределение льда из Большой Печоры в Малую, образование мощных катастрофических заторов по обоим протокам (1978, 1999 гг.).

3. Вскрытие Малой Печоры начинается раньше Большой Печоры, как правило, на 1–2 сут, которых достаточно для формирования заторов льда выше д. Андег. Большая Печора вскрывается без заторов или с кратковременными остановками по всей длине (1988, 2004 и 2017 гг.).

4. Ледоход останавливается в заторе ниже с. Оксина на 2–3 дня, оба рукава вскрываются без образования мощных заторов или с кратковременными остановками ледохода (2009, 2012 гг.).

Не была выявлена четкая зависимость между протяженностью заторов и суровостью зимы. В многолетнем масштабе нет весомых доказательств того, что образование заторов участилось и они стали опаснее (см. рис. 2), а «внезапное» увеличение числа заторов с 2000-х гг., как в случае с постом Оксина, по-видимому, связано с изменениями в характере наблюдений на нем (так, с 1946 по 1976 г. по данным гидрологических ежегодников заторов на посту Оксина якобы вообще не было).

И тем более на многолетнюю изменчивость заторов не влияет антропогенное воздействие, как это имеет место быть, например, в устье Северной Двины [2, 26]. Согласно данным Двино-Печорского БВУ [27], последние 15 лет на устьевом участке р. Печоры программа ежегодной подготовки к весеннему ледоходу и половодью включает

организацию наблюдений на временных постах с оповещением населения о гидрологической обстановке через СМИ, укрепление противопаводковых дамб и др., тогда как мероприятия по ослаблению ледяного покрова проводятся, только когда уже начались затопления. Они сводились, главным образом, во время ЧС к взрывным работам по разрушению заторов льда, правда, не всегда учитывалась ледовая обстановка ниже по течению. Например, весной 1998 г. искусственное разрушение ледяного покрова, наоборот, способствовало формированию ледоходных уровней воды выше критических отметок. Поэтому разумнее, принимая во внимание особенности прохождения весеннего ледохода в нижнем течении р. Печоры, в основу противозаторных мероприятий закладывать не ускорение, а, наоборот, задержку вскрытия реки и дельтовых рукавов. Мало того, подмечено, что продолжительные заторы на придельтовом отрезке в определенной мере снижают вероятность заторообразования в дельте. Так было в 1992 г.

Осенние зажоры на устьевом участке Печоры, по имеющимся сведениям, ущерба не создают, хотя повторяемость лет с зажорами высокая — 97 % на посту Ермицы и 60 % на посту Оксина [25].

Неблагоприятные последствия имеет аномальное по срокам ледообразование. Оно приводит к более раннему сворачиванию навигации на реке, отодвигает сроки открытия ледовых переправ и зимников — до достижения ледяным покровом в реке необходимой толщины и прочности. Для участков постов Ермицы и Нарьян-Мар раннее начало осеннего ледообразования (раньше 5 и 2 октября) и завершение навигации наблюдаются крайне редко: за период наблюдений всего по 2 случая. Ледовые переправы и зимники играют ключевую роль в перевозке грузов и людей в продолжительный зимний период, поскольку Республика Коми и Ненецкий АО имеют очень низкую обеспеченность автомобильными дорогами с твердым покрытием и мостами через реки, не говоря уже о железных дорогах. Поэтому наиболее проблемными являются переходные периоды, когда нет ни навигации, ни ледовых переправ [12]. До открытия в декабре 2022 г. федеральной трассы Нарьян-Мар — Усинск регион большую часть года был отрезан от Большой земли. Альтернативой были авиатранспорт, судоходство летом и зимники зимой. Но даже сейчас транспортная доступность г. Нарьян-Мара ограничена отсутствием автомобильного моста через реку в районе с. Усть-Уса.

Речные наводнения и комбинированные решения по их изучению и описанию

Затопления речными водами на устьевом участке Печоры сопровождают весеннее половодье и ледоход. Это не случайно, поскольку уровень воды в реке и дельтовых рукавах значительно повышается (ΔH) благодаря увеличению Q , а при одновременном образовании заторов льда дополнительно (к стоковому подъему уровня) добавляется подпорная составляющая ($\Delta H_{\text{зтр}}$). Согласно [25], максимальные заторные подъемы уровней воды у г. Нарьян-Мара достигают 2,0–3,5 м, а на придельтовом отрезке (у с. Ермицы) они еще выше — 3,7–4,0 м. При этом средняя величина $\Delta H_{\text{зтр}}$ равна 2,2 и 2,7 м. По данным из [28], 19, 47 и 71 % высших уровней на постах Усть-Цильма, Ермицы и Оксина (соответственно) наблюдались в 1950–2020 гг. при заторе льда или беззаторном прохождении ледохода.

Повторяемость, продолжительность и глубина затопления (пойменной суши) авторами статьи оценивалась путем сравнения среднесуточных уровней воды на постах и так называемых критических высотных отметок. В числе последних — отметка

затопления поймы, отметки неблагоприятного (НГЯ) и опасного (ОЯ) явлений. Выше НГЯ начинается затопление сельхозугодий, отдельных малоценных хозяйственных построек и объектов, выше ОЯ последствия более тяжелые, включая затопление жилой застройки, транспортной и социальной инфраструктуры, промышленных объектов. Практически для всех постов эти отметки установлены (рис. 3), однако они могли меняться со временем. Так, согласно [6], отметка НГЯ для г. Нарьян-Мара

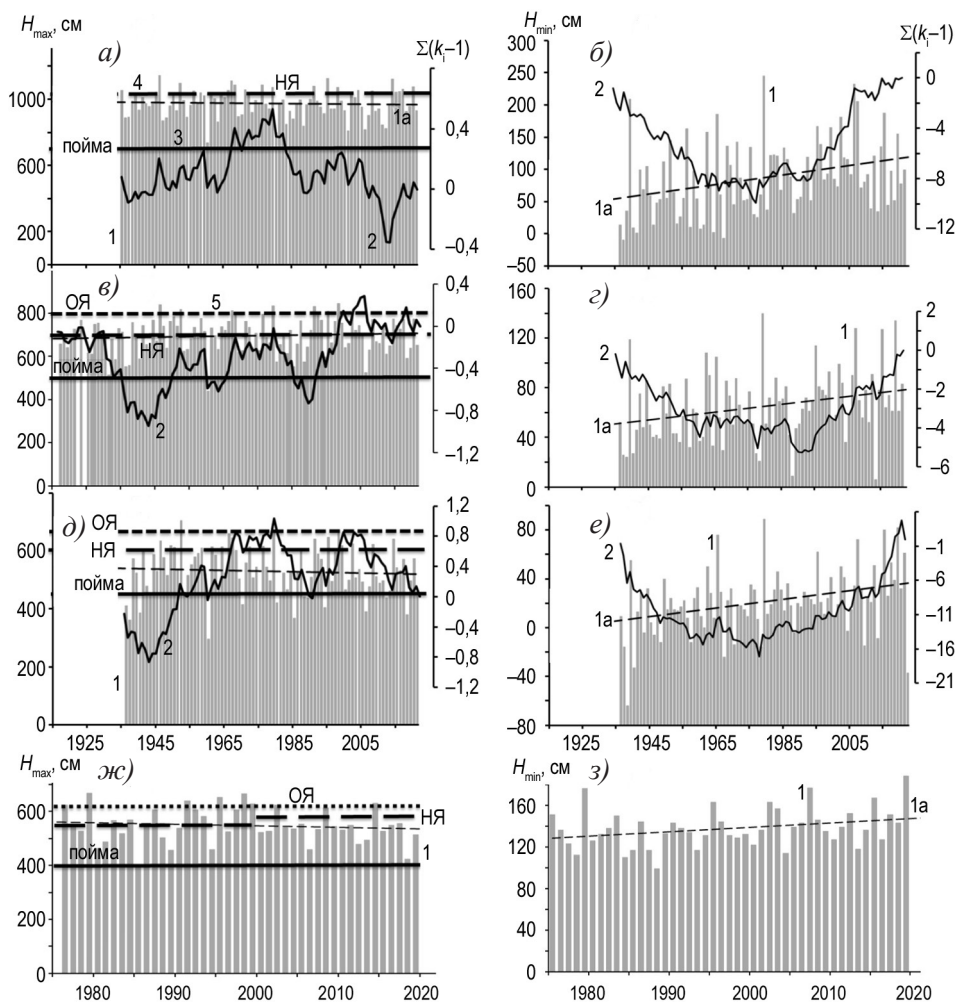


Рис. 3. Многолетние колебания высших (а, в, д, ж) и низших (б, г, е, з) уровней воды (1) с указанием линейного тренда (1а), разностные интегральные кривые характерных уровней (2), критические отметки — затопления поймы (3), неблагоприятного (4) и опасного (5) явлений. Посты: Ермицы (а, б), Оксино (в, г), Нарьян-Мар (д) и Андег (ж, з)

Fig. 3. Long-term fluctuations of maximum (а, в, д, ж) and minimum (б, г, е, з) water levels (1) with a linear trend (1а), differential integral curves of levels (2), critical altitude marks — floodplain flooding (3), adverse (4) and dangerous (5) phenomena.

Gauges: Yermitsy (а, б), Oksino (в, г), Naryan-Mar (д) and Andeg (ж, з)

была вначале 550 см (над нулем поста). Потом, вероятно после катастрофического наводнения 1998 г. и наращивания противопаводковой дамбы, отметка НГЯ была увеличена до 620 см, а ОЯ до 670 см.

Статистическая и графическая обработка собранных сетевых данных позволила сделать следующие выводы:

1. Стоковые и стоково-заторные затопления, включая и те, которые, по различным документальным свидетельствам, действительно сопровождалось социально-экономическим ущербом, на устьевом участке Печоры происходили в прошлом и по-прежнему продолжают случаться (см. рис. 3). Причем пойма вблизи постов затопляется практически ежегодно, за исключением участка поста Нарьян-Мар, где повторяемость таких событий составила 84 % лет за 1936–2021 гг. и 83 % за 1976–2021 гг. (таблица). Хотя, как будет продемонстрировано ниже, затопление поймы

Таблица

Характеристики превышения уровнями половодья высотных отметок поймы, неблагоприятного (НГЯ) и опасного (ОЯ) явлений

Table

Characteristics of spring flood levels exceeding floodplain height, and altitude marks of adverse and dangerous events

Участок	Посты	Повторяемость (%) за:					
		весь период			1976–2021		
		пойма	НГЯ	ОЯ	пойма	НГЯ	ОЯ
Придельтовый	Ермицы	100	26	н/д	100	26	н/д
	Оксино	99	48/44 ¹⁾	7,5	100	50/43 ¹⁾	8,7
Дельта	Нарьян-Мар	84	24/23 ¹⁾	1	83	20/17 ¹⁾	2
	Андег	—	—	—	100	48/39 ¹⁾	11
	Осколково	—	—	—	100	68/43 ¹⁾	14
Участок	Посты	Продолжительность ²⁾ (сут) за:					
		весь период			1976–2021		
		пойма	НГЯ	ОЯ	пойма	НГЯ	ОЯ
Придельтовый	Ермицы	30/52	5/14	н/д	32/52	6/14	н/д
	Оксино	22/43	6,5/19	—/6	23/43	7/19	—/4
Дельта	Нарьян-Мар	н/д	н/д	н/д	9/28	2,7/4	—/1
	Андег	—	—	—	20/39	3,9/9	—
	Осколково	—	—	—	50/98	4,8/12	—
Участок	Посты	Глубина затопления ²⁾ (м) за:					
		весь период			1976–2021		
		пойма	НГЯ	ОЯ	пойма	НГЯ	ОЯ
Придельтовый	Ермицы	2,7/4,4	0,4/1,1	н/д	2,7/4,3	0,4/0,95	н/д
	Оксино	1,9/3,5	0,6/1,5	0,3/0,5	2,0/3,5	0,7/1,5	0,3/0,5
Дельта	Нарьян-Мар	1,0/2,6	0,3/1,1	0,2/0,4	1,0/2,2	0,4/0,7	0,0
	Андег	—	—	—	1,5/2,7	—	—
	Осколково	—	—	—	2,4/3,9	—	—

Примечание. ¹⁾ с учетом изменения критической отметки на более высокую (с 1998 г.), ²⁾ рассчитано без учета нулевых значений, ³⁾ в знаменателе — максимальное значение, н/д — нет данных.

Note. ¹⁾ taking into account the change of the critical mark to a higher one (since 1998), ²⁾ calculated without taking into account zero values, ³⁾ in the denominator — the maximum value, н/д — there is no data.

вблизи Нарьян-Мара происходит при более низком стоянии уровня в Большой Печоре. На участке поста Ермицы затопление поймы в 23 % случаев происходило дважды за одно половодье — второй раз с прохождением «Усинской волны», сформированной половодными водами р. Усы — крупного правобережного притока р. Печоры.

Превышение отметки НГЯ случается в среднем в 25–50 % случаев опять с самыми низкими показателями на посту Нарьян-Мар (20 %) и наиболее высокими на посту Осколково (68 %, с учетом отметки НГЯ до 1998 г.). Повторяемость случаев превышения отметки ОЯ <10–14 %. Частота превышения НГЯ и ОЯ возрастает к морскому краю дельты, несмотря на распластывание волны половодья. Последний тезис пояснен в работе [8]: половодные подъемы уровня ниже Нарьян-Мара уменьшаются и в процентном выражении составляют (от величины в Нарьян-Маре): 85 % — в 90 км, 60 % — в 70 км, 50 % — в 50 км, 25 % — в 7 км от устьевого створа. Возможно, в этом же направлении влияет снижение высотных отметок местности и увеличение влияния подпорных явлений, в том числе со стороны моря. О возможностях последнего фактора увеличивать риск затопления сообщают и авторы гидродинамической модели устьевой области Печоры [16]. Этот же фактор будет одним из основных в ухудшении ситуации с затоплениями в дельте Печоры из-за прогнозируемого подъема уровня Баренцева моря.

2. В многолетнем плане повторяемость затоплений (в силу изменений максимального уровня половодья) практически не меняется. Все тренды (и убывающие для постов Ермицы, Нарьян-Мар, Андег, и возрастающие для поста Оксина, и нейтральный для поста Осколково) статистически незначимы по критерию Спирмена (при $\alpha = 5\%$). На разностных интегральных кривых для разных постов была обнаружена схожая цикличность в многолетних колебаниях высших уровней с примерной продолжительностью самых долгопериодных циклов в 25 лет (см. рис. 3), и, по-видимому, река находится еще на этапе повышенных уровней воды с высоким риском затоплений.

3. Продолжительность (T) затопления, наоборот, испытала значительные многолетние изменения (рис. 4): длительность затопления поймы повсеместно увеличивалась, тогда как T превышения уровнем отметки НГЯ выросла на постах на придельтовом отрезке и снизилась в дельте. Все это укладывается в концепцию, с одной стороны, увеличения объема стока половодья, расходов и уровней воды в основной его части, а с другой, некоторого снижения максимальных расходов на его пике [29]. В итоге средняя продолжительность затопления поймы оказалась равной 10–30 сут (с максимальной величиной на участке поста Осколково в 50 суток) (таблица). Максимальная T может достигать 1,5–3 мес. Длительность неблагоприятных затоплений существенно меньше — в среднем от 0,5 до 1 нед., максимальная — до 2,5 нед. Получены связи между максимальными за год уровнями ($H_{\max}$) и продолжительностью затопления, но они оказались слабыми, за исключением поста Нарьян-Мар. На характер связи заметное влияние оказывают условия, сопровождавшие формирование $H_{\max}$: обусловлен ли он только прохождением максимальных расходов воды, или еще были ледовые явления и, прежде всего, заторы льда. Поэтому при их применении авторы рекомендуют использовать верхнюю огибающую как максимально возможную продолжительность при наблюдаемом или прогнозируемом уровне. Для поста Оксина ее можно приблизительно описать уравнением: $T = -0,00033H_{\max}^2 + 0,59H_{\max} - 215$.

4. Глубина затопления поймы варьирует от 1,0 до 2,5 м, максимальная — до 4,5 м (см. таблицу). Такие же величины дает и гидродинамическая модель для дель-

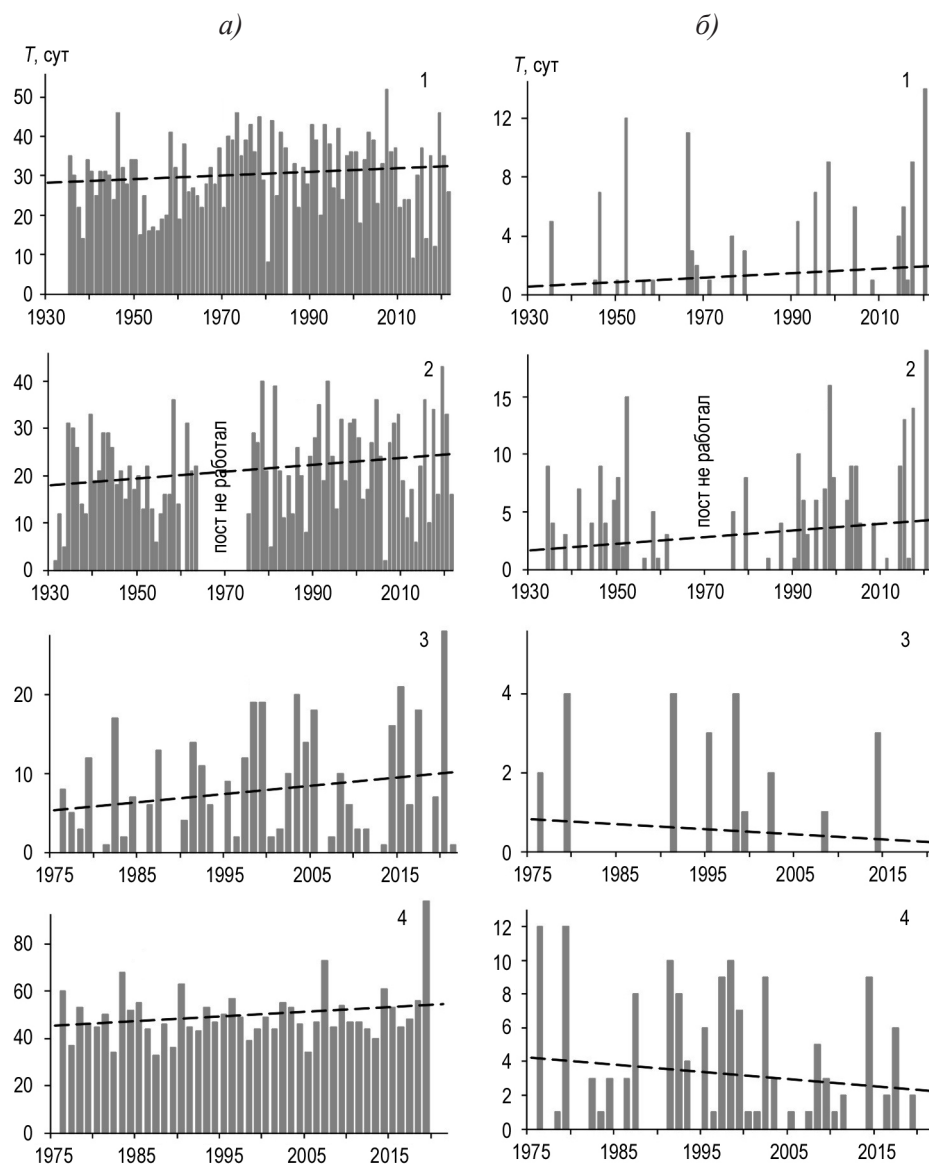


Рис. 4. Многолетние изменения продолжительности затопления поймы (а) и превышения уровнями половодья отметки неблагоприятного явления (б), с линейными трендами, на постах Ермицы (1), Оксино (2), Нарьян-Мар (3) и Осколково (4)

Fig. 4. Long-term fluctuations in the duration of floodplain flooding (a) and flood levels exceeding the adverse event mark (b), with linear trends, at the gauges of Yermitsa (1), Oksino (2), Naryan-Mar (3) and Oskolkovo (4)

ты Печоры [16]. Обнаружена интересная закономерность: к Нарьян-Мару глубина затопления снижается в 2–2,5 раза, затем к морю вновь увеличивается. Величина превышения отметок НГЯ составила 0,3–0,7 м, максимальная не превышала 1,5 м.

5. Высшие уровни весеннего половодья, как и генерируемые ими опасные затопления, обычно наблюдались во второй и третьей декадах мая, первой декаде июня. На посту Ермицы доля этих месяцев составила 65 % (по данным за 1935–2021 гг.), в Оксино — 78 % (1917–1963, 1975–2021 гг.), в Нарьян-Маре — 84 % (1936–2021 гг.). Самое опасное время в плане прохождения высших уровней воды — это 10 мая — 2 июня (Ермицы), 12 мая — 6 июня (Оксино), 14 мая — 5 июня (Нарьян-Мар). Причем на посту Ермицы опасным можно также считать период с 10 по 20 июня — во время так называемой «Усинской волны половодья» и, по сути, в условиях уже открытого русла. Высшие уровни наблюдаются все раньше: на 7 дней на посту Ермицы (в 1991–2021 гг., по сравнению с 1936–1990 гг.) и на 2–3 дня на постах в дельте.

Даты начала образования заторов льда опережали даты наблюдаемых на постах максимальных уровней в среднем на 7 сут на посту Ермицы и на 5 сут на посту Оксино. Поэтому опасными декадами в плане заторообразования считаются: для Ермицы — первая–третья декады мая (со средней датой 18 мая), для Оксино — вторая–третья декады мая и в меньшей мере первая декада июня (со средней датой 22 мая).

6. При сопоставлении данных с постов и сведений по факту наводнений, в частности для Нарьян-Мара, по которому больше всего информации, подтвердились сведения из работы [6], в которой сообщалось, что почти каждый второй год город подвергался затоплениям и критическим уровнем была отметка в 550 см. По-видимому, для отдельных районов г. Нарьян-Мара (в прибрежной зоне) эта отметка сохранилась и в настоящее время, тогда как опасные и особо опасные затопления случаются при уровнях выше 600–620 см и 670 см.

Вообще основной ущерб в устье Печоры возникает при затоплении именно г. Нарьян-Мара. В картах к «Проекту изменений в генеральный план МО «Городской округ «город Нарьян-Мар»» [30], по состоянию на 2020 г., приводятся границы подверженной затоплению части города при достижении уровнем в Большой Печоре отметки ОЯ (670 см). Границы таких же опасных районов приводятся в «Паспорте безопасности территории МО «Приморско-Куйский сельсовет»» уже для сельских поселений.

Самое первое известное наводнение случилось в районе г. Нарьян-Мара еще в 1912 г., когда собственно города еще не было, но был лесозавод «Стелла Поларе». Уровень во время него поднялся до отметки в 740 см. Первое масштабное наводнение произошло в 1952 г. ($H_{\max} = 706$ см на посту Нарьян-Мар и 816 см на посту Оксино (см. рис. 3)). Были затоплены центр города и прилегающие районы, по центральной улице Смидовича можно было передвигаться только на лодках. Следующие наводнения, о которых сохранились документальные свидетельства, в частности в городском Ненецком краеведческом музее и местной газете «Нарьяна вындер» («Красный тундровик»), были здесь в 1966, 1972, 1976, 1977 и 1979 гг. Одно из масштабных наводнений случилось в начале июня 1998 г. Максимальный уровень во время него поднялся до отметки в 672 см, а на посту Оксино — до 846 см. В результате было затоплено 1676 домов из 2620 на 65 % территории города, 15 объектов экономики, 60 объектов торговли и питания, 12 школ и 30 % объектов здравоохранения, 7 котельных и 31 км дорог; были эвакуированы 49 человек. Жертв удалось избежать. Военные самолеты Су-24 сбросили на ледовые заторы несколько десятков 250-килограммовых авиабомб; также в устранении заторов участвовали саперы. Затоплению подверглись (полностью или частично) также сельские населенные пункты Мархида, Тошвиска, Великовисочно, Лабожское, Оксино, Макарово, Андег, Красное, Осколково, Куя, Нарыга. Общий ущерб составил 52 млн руб. в ценах

1998 г. В 2008 г., также в начале июня и при уровне 624 см, было затоплено около 25–30 % территории города. В конце мая 2014 г. по всему устьевому участку Печоры прокатилось очередное масштабное наводнение. В г. Нарьян-Маре (при $H_{\max} = 642$ см) в зоне затопления оказались 126 домов, пострадали районы «Старый аэропорт», Малый Качгорт, поселки Лесозавод и Сахалин. Следующие наводнения были в 2015 и 2017 гг., причем по причине плохого состояния противопаводковой дамбы.

С целью более глубокого понимания механизмов развития затоплений в районах размещения населенных пунктов, установления границ опасных зон и обоснования эмпирических связей между данными стационарных наблюдений и спутникового зондирования на даты весенних разливов речных вод были отобраны и обработаны космические снимки начиная с 1991 г. В результате:

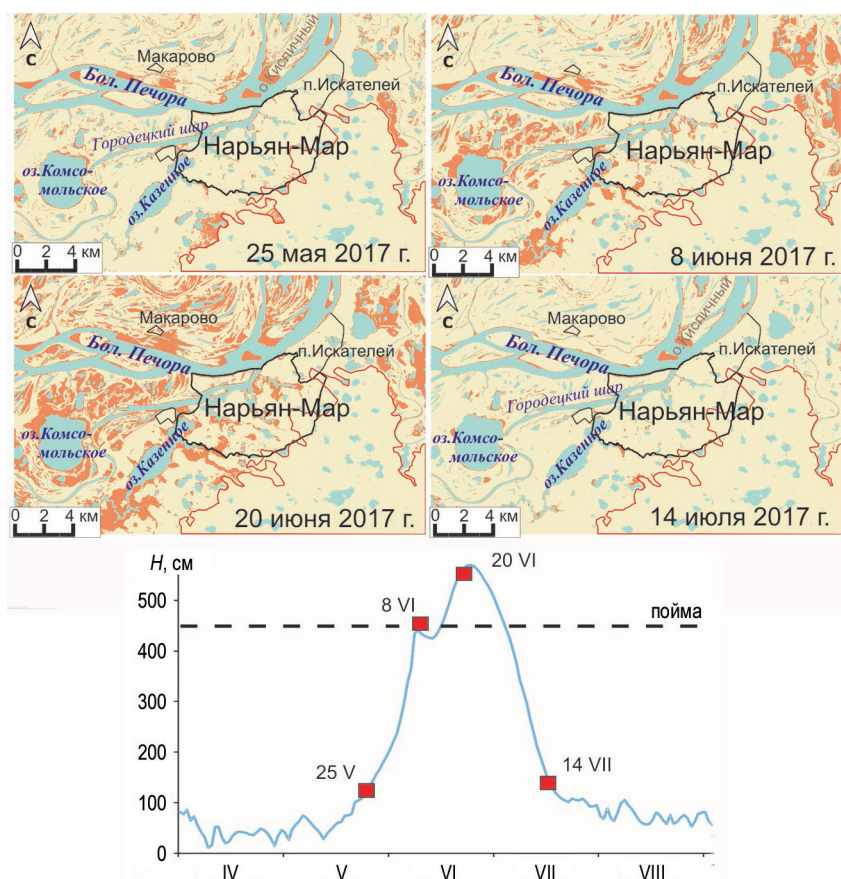


Рис. 5. Картосхемы развития затопления в районе г. Нарьян-Мара в половодье 2017 г. с графиком колебаний среднесуточных уровней на посту Нарьян-Мар с 1 апреля по 31 августа 2017 г. Затопленные территории показаны коричневым цветом, красной линией — незатопляемые районы, черной — границы населенных пунктов

Fig. 5. Maps of flooding development in the Naryan-Mar city during the spring flood of 2017 with a graph of daily levels, from April 1 to August 31, 2017.

The flooded territories are shown in brown, the red line shows areas that are not flooded, the black line denotes the borders of settlements

1. Был детально изучен сам процесс начала, развития и завершения затоплений в двух секторах устьевом участка Печоры (рис. 1) — при разных расходах и уровнях воды, ледовых условиях. Примеры этих схем приведены на рис. 5 и 6.

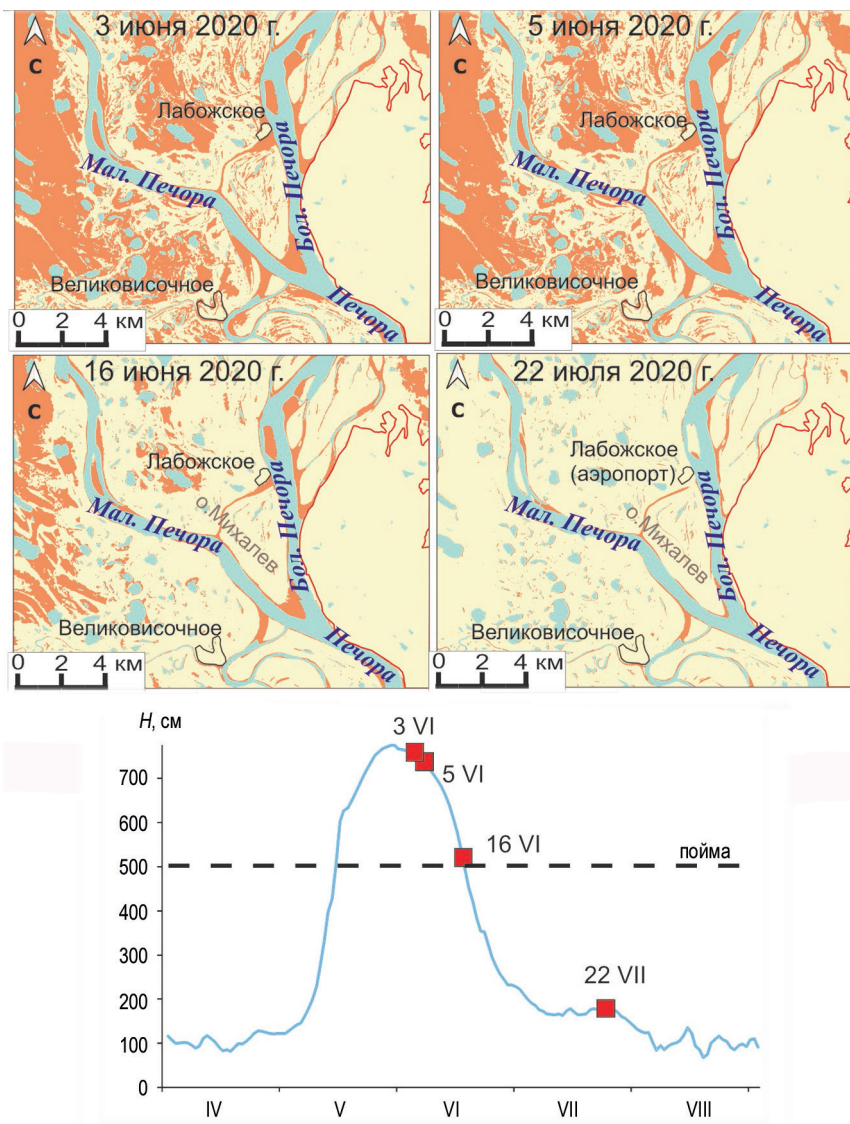


Рис. 6. Картограммы развития затопления в районе аэропорта Лабожское в половодье 2020 г. с графиком колебаний среднесуточных уровней на посту Оксино с 1 апреля по 31 августа 2020 г. Затопленные территории показаны коричневым цветом, красной линией — незатопляемые районы, черной — границы населенных пунктов

Fig. 6. Maps of flooding development in the Labozhskoe during the spring flood of 2020 with a graph of daily levels (gauge Oksino), from April 1 to August 31.

The flooded territories are shown in brown, the red line shows that areas that are not flooded, the black line denotes the borders of settlements

Установлено, что, хотя уровнем выхода на пойму на посту Нарьян-Мар считается 450 см, а отметки НГЯ и ОЯ еще выше, к примеру, район Качгорт и участок между Большой Печорой и Городецким Шаром, по утверждению местных жителей и газет, страдающие от разлива речных вод значительно чаще, чем центральные районы города, действительно начинают затопливаться при уровнях меньше 350 см, с заметным увеличением площади затопления при уровнях $>350\text{--}400$ см.

2. Установлены границы и определены площади затопления для всех случаев, когда это наблюдалось и были кондиционные спутниковые снимки на эти даты. Для Нарьян-Мара и его окрестностей определялись дополнительно объекты (их число, тип), попавшие в зону затопления, сведения по которым предоставляет база пространственных данных отдела Геоинформационных систем Ненецкого информационно-аналитического центра (НИАЦ).

3. Для первого (Великовисочное и Лабожское) и второго (г. Нарьян-Мар и его окрестности) полигонов построены эмпирические зависимости между уровнями воды (H) и площадью затопления (F). Они нелинейные: $F(\text{№ } 1) = 0,00026H^2 - 0,07H + 10,3$ (по уровням Оксина), $F(\text{№ } 2) = -0,000074H^2 + 0,17H - 5,73$ (по уровням Нарьян-Мара). Для полигона № 2 $R^2 = 0,92$. Причем теснота этой связи сильно не меняется при использовании только оптических ($R^2 = 0,94$) или только радиолокационных снимков ($R^2 = 0,88$), которых меньше. Незначимые различия между связями, обоснованными по разным типам снимков, доказывают возможность их совместного использования. Для первого полигона $R^2 = 0,95$. С максимальными расходами воды связь площадей затопления намного слабее и не такая выраженная.

В свое время, в 2012 г., В.Ф. Полонским (ГОИН) при обработке 4 спутниковых снимков (МК-4 Ресурс Ф1 и Landsat 9) на даты 09.09.1985, 26.06.1990, 12.06.1993 и 19.06.2000 была получена связь между уровнями на посту Андег и площадью дельты (% общей площади), покрытой водой. Согласно ей, при уровнях примерно до 250 см она не превышала 40 %, а при уровне в 600–640 см и выше она стремилась к максимально возможному (с учетом рельефа дельты) величинам.

4. Также было проанализировано возможное влияние заторов на масштабы затопления. Хотя используемые снимки фиксируют обстановку в разные этапы развития половодья, как для первого, так и для второго полигона наибольшие по площади затопления наблюдались в годы с заторными явлениями. С продолжительностью заторов связь площади затопления не выявлена.

В итоге установлено, что полученные с использованием материалов дистанционного зондирования данные достаточно четко согласуются с материалами наземных наблюдений и документальными свидетельствами.

Опасные обмеления

Опасное обмеление рек, дельтовых водотоков и водоемов, включая устьевое взморье, обнаруживает себя критическим понижением уровней воды и глубин [4]. Его основными причинами могут быть значительное уменьшение расходов воды, ветровые сгоны, мощные и продолжительные зажоры выше по течению, сочетание нескольких процессов. Глубины могут уменьшаться также из-за отложения наносов и повышения отметок дна.

Устьевая область Печоры занимает важное место в обеспечении Ненецкого АО и Республики Коми основными жизненно важными товарами и в вывозе производимой в регионе продукции. Здесь находится крупный речной и морской порт —

г. Нарьян-Мар. В период навигации водным транспортом в Ненецкий АО доставлялось около 85 % всех грузов (по состоянию на 2016 г.). До недавнего времени (до 2023 г.) до Нарьян-Мара можно было добраться летом–осенью только авиатранспортом или на пароме. Большинство сельских населенных пунктов в устье по-прежнему связаны между собой и с Нарьян-Маром только благодаря водному транспорту.

Морская навигация в устье Печоры длится с июня до середины ноября, речная — с конца мая по начало октября. В июле, августе и сентябре судоходство на реке и в ее устье лимитируют низкие уровни и недостаточные глубины, например, на Куйских перекатах и устьевом баре. Последнее неблагоприятное событие было летом 2022 г., когда уровень на посту Нарьян-Мар снизился до неблагоприятной отметки. Навигация на реке остановилась на несколько недель, и возвращающиеся из отпусков жители города не могли попасть домой. Был введен режим ЧС. Предыдущие неблагоприятные события, о которых достоверно известно, наблюдались летом 2016 г. и 2018 г. В последнем случае пассажирские перевозки не пострадали, тогда как грузоперевозки снизились на 30 %. Одна из причин этих событий — многолетнее (почти 20–30 лет) отсутствие дноуглубительных работ, которые в советское время проводились почти ежегодно [24].

В работе [2] ситуация с опасными обмелениями анализировалась с учетом всех минимальных уровней — как во время навигационного сезона, так и за его пределами. В итоге по данным стационарного мониторинга на устьевом участке Печоры оказалось, что почти все случаи критического снижения уровней воды пришлось на календарную зиму и весну. Они могли иметь стоковый, стонный или смешанный генезис. Если брать период с 1950 по 2017 г., то из примерно 18–20 событий (в дельте) 61 % пришлось на март–апрель, 26 % — на февраль. Наиболее сложными, по-видимому, были 1952, 1956, 1966, 1970, 1979, 1985 гг. и, особенно, 1974, 1977 и 2010 гг.

В настоящей работе рассмотрены только критические обмеления в навигационный сезон, поскольку именно они способны создавать какой-то ущерб. При этом использованы данные по постам, начиная от Усть-Цильмы и заканчивая Осколково, за период с 1936 по 2022 г. Отметка НГЯ для Усть-Цильмы — 75 см. Для Ермицы такой отметки найти не удалось. Для постов в дельте отметки НГЯ взяты по состоянию на 1980–2000-е гг. из справочников «Ежегодные данные о режиме и качестве вод морей и морских устьев» (Том 2. Том 3. Часть 1–2). Анализ данных показал, что в навигационный сезон случаи снижения уровня на постах в дельте ниже критических отметок единичные: Оксина — ни одного, Нарьян-Мар — 4 (повторяемость 4,6 %), Осколково — 1 (за 1978–2021 гг.), Андег — ни одного (за 1975–2019 гг.). Тогда как на посту Усть-Цильма повторяемость таких событий составила 46 %. Таким образом, нарушение речного судоходства на устьевом участке в подавляющем большинстве случаев связано не с низкими уровнями в дельте, а с обмелением в русле реки выше по течению — на протяжении нижнего течения и выше него. В результате суда из портов в Республике Коми не могут спуститься в устье Печоры и, наоборот, корабли, осуществляющие Северный завоз, не могут подняться вверх по течению. Причем не обязательно, чтобы критическое снижение уровней в среднем течении Печоры (выше устья р. Усы) охватывало бы и нижнее течение реки. Так, например, было летом в кризисный 1966 г. [24]. В среднем этот проблемный период на посту Усть-Цильма длится с 11 августа по 6 сентября, с самой ранней датой 18 июля (2013 г.). Его средняя продолжительность 24 сут, максимальная — 72 сут (2011 г.). Средние даты

наступления минимальных уровней летне-осеннего сезона: 24 августа (Усть-Цильма), 27 августа (Ермицы), 28 августа (Оксино) и 2 сентября (Нарьян-Мар).

В многолетнем плане ситуация с минимальными уровнями в летне-осенний сезон на всех рассматриваемых постах улучшилась (см. рис. 2). В 1991–2021 гг. (по сравнению с предыдущим периодом) уровни повысились на 0,15 м (Усть-Цильма), 0,35 (Ермицы), 0,17 (Оксино) и 0,16 м (Нарьян-Мар). Первый «положительный перелом» случился во второй половине 1970-х гг. (в среднем течении Печоры еще раньше), второй и более выраженный — в начале 1990-х гг. Это отвечает тем положительным изменениям (+22 %), которые произошли с меженным стоком Печоры в августе — с 1990-х гг. Но, поскольку сток в июле и сентябре изменился мало или даже уменьшился (в июле на 11 %), нельзя говорить, что ситуация с ограничениями по глубине для судов улучшилась или улучшается. Особенно это относится к последним 15 годам. И опять же пример тому — сильное обмеление в августе–сентябре 2022 г. Мало того, многолетним колебаниям количества дней с уровнями воды ниже отметки НГЯ на посту Усть-Цильма присущ хотя и не значимый, но все же возрастающий тренд: увеличение составило 3,5 сут. При сравнении двух периодов значимых изменений в датах прохождения минимальных уровней воды не выявлено.

Ветровые сгоны редко приводят к критическим понижениям уровня воды в дельте. С 1976 г. это было как раз 31 декабря 1976 г., когда уровень на постах Оксино и Нарьян-Мар опустился на 15–20 см ниже отметки НГЯ. Поскольку это было зимой, вне навигационного сезона, это событие не может рассматриваться как неблагоприятное. Возможно, неблагоприятный сгон (на фоне низких стоковых уровней) был в сентябре 1938 г. Максимальные величины сгона у Нарьян-Мара могут достигать 60–80 см. На морском крае дельты они больше примерно на 50 %.

Прочие опасные и неблагоприятные гидрологические явления и процессы

Еще не рассмотренные ОГЯ на устьевом участке р. Печоры — это штормовые нагоны и проникновение морских вод на устьевой участок. Правда, в работе [2] сообщается, что, например, морские колебания уровня действительно оказывают влияние на многие устьевые гидрологические процессы, но в качестве опасных явлений в самой дельте не рассматриваются. По новым данным установлено, что штормовые нагоны, в сочетании с приливами и сильным волнением, приводили к затоплению поселка геологов недалеко от пос. Варандей, разрушению сооружений и других народнохозяйственных объектов, смыву грузов, расположенных в прибрежной зоне. Заметный ущерб от нагонов был в 1976 г. и 29 сентября 1991 г. Больше деталей известно о событиях 5–9 октября 1994 г. Тогда произошло затопление поселка геологов в 3 км на северо-восток от пос. Варандей. Глубина затопления составила 1 м, пострадала часть домов, были разрушены водовод и дамба, размывалась часть берега. Через год, 13–14 декабря 1995 г., пострадал сам пос. Варандей: ветром был разрушен водовод, и 1,5 сут поселок был без питьевой воды, повреждена ЛЭП, частично затоплена жилая часть поселка. Осенью 2005 г. вода во время штормового нагона поднялась до кладбища на Старом Варандее, причал и вертолетная площадка были затоплены (между Старым и Новым Варандеем глубина затопления была до 1 м); в поселке сейсморазведки штормом смыло семь домиков; размывало мост, опять пострадал берег — размыв составил от 3 до 15 м; две баржи с грузом утонули, был один погибший. Последний значительный нагон был 24 июля 2010 г. [31]. Он

привел к значительному затоплению территории, к размыву автодороги, разрыву газопровода, обрыву ЛЭП, нарушению работы метеостанции, разрушению одних хозяйственных строений и погребению других под слоем грунта, перемещению судов на сушу на десятки метров от берега.

Правда, стоит отметить, что эта часть устьевой области Печоры к устьевому участку не относится: она находится, по сути, на границе полузакрытого и открытого устьевого взморья. На самом устьевом участке, полностью находящемся в зоне влияния ветровых нагонов, средняя величина нагона у Нарьян-Мара достигает 65 см, а максимальная — 1,4–1,5 м [8]. Поскольку происходит это обычно в межень, то такой подъем уровня относительно низкого меженного не создает серьезных затоплений. На входе в Большую Печору они, видимо, могут достигать 2–3 м [17], но здесь практически нет построек и инфраструктуры и, следовательно, ущерба. Кроме того, поскольку ледостав на устьевом участке Печоры устанавливается в конце октября (в среднем), часть штормовых нагонов, возникавших в ноябре и декабре, не могли вызвать опасный подъем уровня в дельтовых рукавах.

В отношении проникновения морских вод на устьевой участок, т. е. в дельтовые рукава, известно следующее [5, 8]. Основная устьевая зона смешения речных и морских вод расположена в меженный сезон в Печорской губе; ее ширина 50–60 км. Поступление осолоненной воды на устьевой бар Большие Печоры начинается при расходах в Печоре $<4000 \text{ м}^3/\text{с}$ и при сильных нагонах. При расходах $<2000 \text{ м}^3/\text{с}$ эти воды достигают уже устьевого створа Большие Печоры, а под влиянием опять же нагонных северных, северо-западных и северо-восточных ветров вода может проникать на 5–7 км вверх по рукаву. При этом соленость в поверхностном слое составляла 5 ‰, а в придонном — 10–15 ‰ (при фоновой солености в море 33–35 ‰). В 1947 и 1948 гг., во время глубокой летне-осенней межени, соленость 10–15 ‰ фиксировалась в поверхностном слое. С установлением припая в Печорской губе дальность проникновения солоноватой воды уменьшается. На дальность проникновения могут влиять дноуглубительные работы, особенно на устьевом баре, как это произошло в устье р. Яны [17].

В еще одной работе, посвященной проникновению морских вод на устьевой участок Печоры, его дальность оценена величиной 85 км — выше д. Куя, до участка «Куйских ям» [32]. Правда, оценки получены по гидравлическим расчетам. Тем не менее во время измерений ниже г. Нарьян-Мара в 1982 г. были обнаружены солоноватые воды в глубоких ямах на дне, но их гидрохимический анализ не проводился, поэтому неизвестно их происхождение. Так или иначе, нет свидетельств того, что водоснабжение населенных пунктов Юшин (в 27 км от Печорской губы), Осколково (53 км) и Нарьян-Мар (95 км), находящихся в зоне возможного проникновения осолоненных вод, каким-то образом испытывало проблемы. Мало того, увеличение стока Печоры обуславливает снижение солености вод в устьевой зоне смешения: на МГ-2 Мыс Константиновский это происходит со скоростью 0,04 ‰ за год (1980–2020 гг.); в течение года она меняется здесь с 25 ‰ в феврале до почти 2 ‰ в июне.

Согласно [33], морфодинамические процессы не имеют опасной интенсивности. Как и во всех устьях, переформирование русел происходит, но, во-первых, не обнаружено сведений о высокоинтенсивных и опасных размывах берегов; во-вторых, отложение наносов в судоходных рукавах и на взморье решается стандартным дноуглублением при условии его регулярности. Морской край дельты Печоры относительно стабилен.

Выводы

На устьевом участке р. Печоры, протягивающемся от устья р. Сулы до Печорской губы, основную угрозу и социально-экономический ущерб создают речные наводнения. Свидетельством этому служат результаты обработки данных многолетних стационарных гидрологических наблюдений (вплоть до 2021–2022 гг.), спутниковых снимков (с 1991 г.) и фактические сведения по самим наводнениям и их последствиям.

Наводнения в устье Печоры имеют стоковый и стоково-заторный генезис. Они сопровождаются весеннее половодье и обычно ледоход, во время которых практически ежегодно затоплялась пойма на участках постов, в 25–50 % случаев (за инструментальный период) наблюдалось превышение уровнями в реке и дельтовых рукавах отметки НГЯ, в менее чем 10–14 % случаев — превышение отметки ОЯ. Серьезнее всего от затоплений страдает г. Нарьян-Мар. По собранным сведениям, серьезные наводнения здесь были в 1912, 1952, 1966, 1972, 1976, 1977, 1979, 1998, 2008, 2014, 2015 и 2017 гг., а по [6], с 1909 по 1968 г. 31 раз высший уровень в Нарьян-Маре превысил критическую отметку. В 1998 г. ущерб от масштабного наводнения составил 52 млн руб. Продолжительность неблагоприятных затоплений в среднем колеблется от 0,5 до 1 недели (без учета остаточных явлений), максимальная достигает 2,5 недели; затопление поймы длится существенно дольше. Самым опасным периодом признаны вторая и третья декады мая, первая декада июня. На придельтовом отрезке опасной можно также считать вторую декаду июня в связи с прохождением «Усинской волны» половодья. Сопоставление данных наземного и дистанционного мониторинга позволило выяснить условия и закономерности разлива речных вод на участках с. Великовисочное, аэропорт Лабожское и г. Нарьян-Мар (с окрестностями), влияние заторов льда, определить границы зон затопления. Построены эмпирические зависимости между уровнями воды на постах и площадью затопления, между высшими уровнями и продолжительностью затопления. Они обладают, в том числе, прогнозным потенциалом. В многолетнем плане повторяемость затоплений практически не меняется — тренды незначимые. Длительность затопления поймы повсеместно росла, тогда как время превышения уровнем воды в реке и рукавах отметки НГЯ увеличилось на придельтовом отрезке и снизилось в дельте. Высшие уровни стали наблюдаться на 2–7 дней раньше.

Еще одно опасное гидрологическое явление — заторы льда — следует рассматривать как один из главных факторов наводнений в устье Печоры. Скопление льда в русле и его навалы на берегах, по имеющимся сведениям, к ущербу приводили очень редко. Установлено, что данные с постов занижают число лет с заторами. Согласно лишь стационарным наблюдениям, повторяемость образования заторов льда равна 27–45 %, а при дополнительном учете результатов сопоставления среднесуточных уровней на соседних постах она выше 60 %. В целом высшие годовые уровни сопровождались ледовыми явлениями в 71 % случаев на посту Оксина и 87–91 % случаев на постах в дельте. Даты начала образования весенних заторов льда опережали даты наблюдаемых на постах высших уровней в среднем на 5–7 сут. Продолжительность заторов варьирует от 1 до 3–5 сут, реже — дольше. Выделены 4 основных сценария вскрытия, которые могут быть основой при разработке мер по предотвращению негативных последствий от заторов льда. Уточнено местоположение основных участков заторообразования. В многолетнем масштабе нет весомых доказательств того, что образование заторов участилось и они стали опаснее.

Третье гидрологическое явление, которое ограничивает хозяйственную деятельность в устье Печоры, — это неблагоприятные стоковые обмеления, нарушающие судоходство на реке и в ее устье. Последнее такое масштабное событие, с объявлением ЧС, случилось в августе–сентябре 2022 г. Установлено, что нарушение речного судоходства на устьевом участке в подавляющем большинстве случаев связано не с низкими уровнями в дельте, а с обмелением в среднем и нижнем течении реки. В результате нарушается сообщение между портами Ненецкого АО и Республики Коми, останавливается Северный завоз. В среднем этот период на посту Усть-Цильма длится с 11 августа по 6 сентября, с самой ранней датой 18 июля (2013 г.). Его средняя продолжительность 24 сут, максимальная — 72 сут (2011 г.). В многолетнем плане ситуация с минимальными уровнями в летне-осенний сезон улучшилась.

В отношении остальных неблагоприятных гидрологических явлений — аномального (по срокам) ледообразования, проникновения морских вод в рукава дельты, штормовых нагонов и сгонов — установлено, что они не создают ущерба либо из-за своей малой интенсивности и повторяемости, либо из-за принадлежности к другим частям устьевой области Печоры.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Работы выполнены в рамках тем НИР I.10 кафедры гидрологии суши МГУ по Государственному заданию, № FMWZ-2022-0001 Государственного задания ИВП РАН (наводнения и опасные обмеления) и 2.2 НИР Росгидромета, регистрационный номер АААА-А20-120112690064-2 (заторы льда).

Competing interests. The authors declare no conflict of interest.

Funding. The work was carried out within the framework of the research topics No I.10 of the Department of Land Hydrology of Lomonosov MSU (registration number 121051400038-1), and No FMWZ-2022-0001 of WPI RAS (charts on floods and dangerous shoals), and No 2.2 of Roshydromet, registration number ААААА-А20-120112690064-2 (chart on ice jams).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Михайлов В.Н., Михайлова М.В., Магрицкий Д.В. *Основы гидрологии устьев рек: учебное пособие*. М.: Триумф; 2018. 316 с.
2. Magritsky D., Lebedeva S., Skripnik E. Hydrological hazards at mouths of the Northern Dvina and the Pechora rivers, Russian Federation. *Natural Hazards*. 2017;88(1):149–171. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2673-6>
3. *Справочно-аналитический обзор гидрологического режима устьевой области реки Печора*. Москва; Иваново: ПресСт; 2021. 152 с.
4. Магрицкий Д.В. Опасные гидрологические явления и процессы в устьях рек: вопросы терминологии и классификации. *Наука. Техника. Технология (политехнический вестник)*. 2016;2:35–61.
Magrickij D.V. Dangerous hydrological phenomena and processes in river mouths: issues of terminology and classification. *Nauka. Tehnika. Tehnologija (politehnicheskij vestnik) = Science. Technic. Technology (Polytechnic Bulletin)*. 2016;2:35–61. (In Russ.)
5. Лупачев Ю.В. Гидрологические условия устьевой области Печоры и их возможные изменения при изъятии части стока из бассейна. *Труды ГОИИ*. М.: МО Гидрометеозиздата; 1979. 143:49–68.
6. *Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 3. Северный край*. Л.: Гидрометеозиздат; 1972. 520 с.
7. Лупачев Ю.В. Особенности динамики весенних ледоходов и заторов льда в устьях Северной Двины и Печоры. *Водные ресурсы*. 2001;28(2):245–249.
Lupachev Ju.V. Features of the dynamics of spring ice flows and ice jams in the mouths of the Northern Dvina and Pechora. *Vodnye resursy = Water resources*. 2001;28(2):245–249. (In Russ.)

8. Полонский В.Ф., Лупачев Ю.В., Остроумова Л.П. Основные черты гидрологического режима устьевой области Печоры. *Труды ГОИН*. М.: МО Гидрометеониздата; 2007. 210:265–284.
9. *Геоэкологическое состояние арктического побережья России и безопасность природопользования*. Под ред. Н. И. Алексеевского. М.: ГЕОС; 2007. 585 с.
10. Банщикова Л.С. Выделение зон затопления при заторных наводнениях (на примере р. Печоры). *Сборник работ по гидрологии*. СПб.; 2011. 28:4–13.
11. Бузин В.А. *Зажоры и заторы льда на реках России*. СПб.: ГГИ; 2015. 240 с.
12. Агафонова С.А., Фролова Н.Л., Василенко А.Н., Широкова В.А. Ледовый режим и опасные гидрологические явления на реках арктической зоны европейской территории России. *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. 2016;6:41–49.
Agafonova S.A., Frolova N.L., Vasilenko A.N., Shirokova V.A. Ice regime and dangerous hydrological phenomena on rivers of the Arctic zone of European Russia. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya = Bulletin of the Moscow University. Series 5. Geography*. 2016;6:41–49. (In Russ.)
13. Сумачев А.Э., Банщикова Л.С. Ледовый режим реки Печора и особенности прогнозирования высшего уровня ледохода. *Гидрометеорология и экология*. 2020;61:446–459. <https://doi.org/10.33933/2074-2762-2020-61-446-459>
Sumachev A.E., Banshnikova L.S. The ice regime of the Pechora River and the features of forecasting the highest ice run level. *Gidrometeorologiya i jekologiya = Hydrometeorology and ecology*. 2020;61:446–459. (In Russ.). <https://doi.org/10.33933/2074-2762-2020-61-446-459>
14. Грищенко И.В., Водовозова Т.Е. Тенденции в изменении климата и опасных явлений погоды на территории Архангельской области и Ненецкого автономного округа. *Экология человека*. 2011;6:22–27. https://www.elibrary.ru/download/elibrary_16357326_97887551.pdf
Grishhenko I.V., Vodovozova T.E. Trends in climate change and dangerous weather phenomena in the Arkhangelsk Region and the Nenets Autonomous Okrug. *Jekologiya cheloveka = Human ecology*. 2011;6:22–27. (In Russ.). https://www.elibrary.ru/download/elibrary_16357326_97887551.pdf
15. Жбаков К.К., Фатхи М.О. Определение границ зон затопления в устьевой области реки Печоры. В кн.: *Сборник докладов Международной научной конференции Четвертые Виноградовские чтения*. СПб.; 2020. С. 441–451.
16. Крыленко И.Н., Алабян А.М., Василенко А.Н., Демиденко Н.А., Панченко Е.Д., Попрядухин А.А. Двумерная гидродинамическая модель устьевой области реки Печоры. В кн.: *Сборник трудов X Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование»*. Том 1. Тверь; 2021. С. 321–324.
17. Михайлов В.Н. *Устья рек России и сопредельных территорий: прошлое, настоящее и будущее*. М.: ГЕОС; 1997. 413 с.
18. Балакина О.Н., Волик В.А., Дуркина Л.М., Полонский В.Ф. Состояние наблюдений и работ в устьевой области р. Печоры. *Труды ГОИН*. М.; 2013. 214:96–107.
19. Алабян А.М., Василенко А.Н., Демиденко Н.А., Крыленко И.Н., Панченко Е.Д., Попрядухин А.А. Приливная динамика вод в дельте Печоры в летнюю межень. *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. 2022;1:167–179.
Alabyan A.M., Vasilenko A.N., Demidenko N.A., Krylenko I.N., Panchenko E.D., Popryadukhin A.A. Tidal flow dynamics in the Pechora River delta during summer low water. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya. = Bulletin of the Moscow University. Series 5. Geography*. 2022;1:167–179. (In Russ.)
20. Проскуряков Б.В., Берденников В.П. Метод оценки мощности заторов и зажоров на реках при использовании опорных кривых. *Труды ГГИ*. Л.: Гидрометеониздат; 1973. 201:38–64.

21. Винников С.Д. Гидравлический метод оценки заторных масс льда в речных потоках. *Метеорология и гидрология*. 1978;6:62–70.
Vinnikov S.D. A hydraulic method for estimating stagnant ice masses in river flows. *Meteorologija i gidrologija = Russian Meteorology and Hydrology*. 1978;6:62–70. (In Russ.)
22. Банщикова Л.С. Мониторинг процесса заторообразования на реках по пространственно-временным графикам уровня воды. *Метеорология и гидрология*. 2008;9:87–93. <https://doi.org/10.3103/S1068373908090082>
Bانشhikova L.S. Monitoring of the process of flooding on rivers according to spatial and temporal graphs of the water level. *Meteorologija i gidrologija = Russian Meteorology and Hydrology*. 2008;33(9):600–604. (In Russ.). <https://doi.org/10.3103/S1068373908090082>
23. Паршуков В.Ф. *Аномальные и катастрофические явления в Коми крае*. Сыктывкар: Коми кн. изд-во; 2005. 128 с.
24. Рочев Р.А. *Судоходство по реке Печоре в XIX — начале XXI вв.: (очерки истории)*. М.: Известия; 2008. 133 с.
25. *Каталог заторных и зажорных участков рек СССР. Т. 1. Европейская часть*. Л.: Гидрометеиздат; 1978. 260 с.
26. Васильев Л.Ю. Весеннее наводнение и противозаторные мероприятия в устьевой области Северной Двины В кн.: *Доклады VI Всероссийского гидрологического съезда. Секция 2. Наводнения и другие опасные гидрологические явления: оценка, прогноз и смягчение негативных последствий*. М.; 2006. С. 223–229.
27. Двино-Печорское бассейновое водное управление Федерального агентства водных ресурсов. Отчет о прохождении половодья и паводков. URL: <http://www.dpbvu.ru/pavodok> (accessed 01.02.2023).
28. Сумачёв А.Э., Банщикова Л.С. Ледовый режим реки Печоры в современных климатических условиях и принципы прогнозирования высшего уровня за период весеннего ледохода. *Успехи современного естествознания*. 2021;10:75–80. <https://doi.org/10.17513/use.37701>
Sumachjov A.Je., Bانشhikova L.S. The ice regime of the Pechora River in modern climatic conditions and the principles of forecasting the highest ice run water level. *Uspehi sovremennogo estestvoznaniya = The successes of modern natural science*. 2021;10:75–80. (In Russ.). <https://doi.org/10.17513/use.37701>
29. Фролова Н.Л., Киреева М.Б., Харламов М.А., Самсонов Т.Е., Энтин А.Л., Лурьев И.К. Картографирование современного состояния и трансформации водного режима рек Европейской территории России. *Геодезия и картография*. 2020;81(7):14–26. <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2020-961-7-14-26>
Frolova N.L., Kireeva M.B., Harlamov M.A., Samsonov T.E., Jentin A.L., Lur'ev I.K. Mapping the current state and transformation of the water regime of the rivers of the European territory of Russia. *Geodezija i kartografija = Geodesy and cartography*. 2020; 81(7):14–26. (In Russ.). <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2020-961-7-14-26>
30. Генеральный план МО «Городской округ «Город Нарьян-Мар»». URL: <https://gkh.adm-nao.ru/> (accessed 02.03.2023).
31. Шабанова Н.Н., Огородов С.А. Варандей-2010 — сильнейший штормовой нагон за всю историю наблюдений: причины, характеристика и последствия. В кн.: *Закономерности формирования и воздействия морских, атмосферных опасных явлений и катастроф на прибрежную зону РФ в условиях глобальных климатических и промышленных вызовов («опасные явления»)*: Мат-лы Междунар. науч. конф. Ростов н/Д.: ЮНЦ РАН; 2019. С. 214–217.
32. Урнышев А.П. *Распространение приливных волн в устьях северных рек*. Сыктывкар: Коми науч. центр; 1993. 124 с.
33. *Эстуарно-дельтовые системы России и Китая: гидролого-морфологические процессы, геоморфология и прогноз развития*. М.: ГЕОС; 2007. 445 с.

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-2-210-221>

УДК 502.51(28):502.175(985)



**Концептуальные и методологические подходы
к организации системы контроля поверхностных вод
Арктической зоны Российской Федерации**

В.А. Румянцев^{1,2}✉

¹ ФБГУ Санкт-Петербургский научный центр РАН, Санкт-Петербург, Россия

² ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,
Санкт-Петербург, Россия

✉office@spbrc.nw.ru

Аннотация. В статье предлагаются научно-методологические основы развития системы контроля пресных вод Арктической зоны РФ, конечной целью которых является возможность получения объективной информации об их экологическом состоянии и качестве воды. Систему контроля за постоянным антропогенным воздействием на пресные воды предлагается организовать на реперных водных объектах, выбранных по ландшафтно-гидрологическому принципу. Состав определяемых на них показателей включает интегральные параметры, характеризующие развитие негативных экологических внутриводоемных процессов в пресных водах.

Ключевые слова: антропогенное воздействие, аэротехногенное загрязнение, внутриводоемные процессы, негативные последствия, пресные воды, экологический кризис

Для цитирования: Румянцев В.А. Концептуальные и методологические подходы к организации системы контроля поверхностных вод Арктической зоны Российской Федерации. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2024;70(2):210–221. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-2-210-221>

Поступила 18.01.2024

После переработки 29.03.2024

Принята 02.05.2024

**Conceptual and methodological approaches
to the organisation of a signal system for controlling
the ecological state of surface fresh waters
in the territory of the Arctic zone of the Russian Federation**

Vladislav A. Rumyantsev^{1,2}✉

¹ St. Petersburg Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

² State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute,
St. Petersburg, Russia

✉office@spbrc.nw.ru

Abstract. An overwhelming part of fresh waters is concentrated in environmentally sensitive small rivers, lakes and swamps. A complete lack of control over their state coupled with the poor economic development of the Arctic zone threatens to lead to large-scale regional and interregional disasters. The article presents an approach to the organisation of a system of control over the ecological state of fresh waters, based on the regularities and generalizations obtained by research and design organisations based on many years of research. It is proposed to locate observation points at reference water bodies selected on the basis of landscape-hydrological zoning of the controlled territory. The set of signal indicators determined at these points will consist of a small number of integral hydro-chemical parameters of water quality which allow describing the formation and development of negative ecological intra-water body processes, as well as, in general terms, the socio-economic consequences of these processes. In general, the proposed approach is the basis for the organisation of a signal system of freshwater monitoring aimed at informing the environmental authorities in advance about the need to take preventive measures to avoid a large-scale environmental crisis.

Keywords: aerotechnogenic pollution, anthropogenic impact, ecological crisis, fresh water, intra-reservoir control, negative consequences

For citation: Rumyantsev V.A. Conceptual and methodological approaches to the organisation of a signal system for controlling the ecological state of surface fresh waters in the territory of the Arctic zone of the Russian Federation. *Arctic and Antarctic Research*. 2024;70(2):210–221. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-2-210-221>

Received 18.01.2024

Revised 29.03.2024

Accepted 02.05.2024

Введение

Соответствующими Указами Президента РФ и Постановлениями Правительства РФ предусмотрено широкое освоение Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ) на период до 2035 г., которое послужит основой социально-экономического развития страны на длительную перспективу¹. Планируется поэтапное освоение АЗРФ с реализацией конкретных целей и задач на каждом из этапов. При этом должна учитываться преемственность результатов, чтобы работы предыдущих этапов не стали препятствием для достижения последующих целей. Сказанное прежде всего относится к вопросу сохранения природной среды Арктической зоны. К сожалению, уже существуют примеры значительного разрушения природной среды в АЗРФ [1–3]. Тысячи тонн минеральных солей, взвешенных веществ, биогенных элементов, сотни тонн тяжелых металлов поступали в поверхностные водные объекты ряда арктических регионов со стоками горнопромышленных комплексов. Среди водоемов Кольского полуострова, экологическое состояние которых существенно ухудшилось в связи с деятельностью комплексов и требует улучшения, оказались Имандра, Большой Вудъявр, Умбозеро, Ловозеро, Ковдор, Чунозеро [3–5]. На севере Средней Сибири вызывает опасение деятельность ГМК «Норильский никель», которая оказывает сильное антропогенное воздействие на Норило-Пясинскую водную систему. Крупное озеро Пясино, площадью более 700 кв. км, из-за многолетнего промышленного загрязнения, в первую очередь тяжелыми металлами, имеет измененные характеристики экосистемы. В результате произошедших в мае 2020 г. аварий на

¹ Указ Президента РФ от 26 октября 2020 г. № 645 «О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года» в ред. от 12.11.2021, 27.02.2023. URL: <https://base.garant.ru/74810556/> (дата обращения: 14.02.2024).

ТЭЦ-3 в г. Норильске в окружающую среду попало около 21 тыс. тонн нефтепродуктов [6]. Нанесенный ими экологический ущерб составил свыше 918 млн рублей.

Причина подобных происшествий заключается в стремлении минимизировать затраты и ускорить получение планируемых промышленных результатов за счет сокращения объемов работ, главным образом в природоохранной деятельности. Одним из способов снижения влияния негативной деятельности предприятий на окружающую среду является своевременное получение контролирующими службами информации о допущенных ими нарушениях.

В данной статье предлагаются научно-методологические основы развития системы контроля поверхностных пресных вод АЗРФ, конечной целью которых является возможность получения объективной информации об их экологическом состоянии и качестве воды.

Обоснование необходимости создания системы контроля состояния пресных вод АЗРФ

В процессе освоения АЗРФ будет происходить развитие арктических регионов с созданием в них горнодобывающих, горноперерабатывающих, нефтедобывающих, нефтеперерабатывающих, химических, энергетических, транспортных и других предприятий. У большинства из них в процессе производственной деятельности образуются огромные объемы опасных загрязняющих веществ [1–3], попадание которых в окружающую среду приведет к образованию так называемых зон экологического неблагополучия, вызванного нарушением условия экологической безопасности водных объектов и запретом на их использование в питьевых, хозяйственно-бытовых и рекреационных целях [7].

По мере расширения хозяйственного освоения и при отсутствии мер по сдерживанию антропогенного воздействия ситуация в этих зонах постепенно перерастет в единый региональный экологический кризис, а возможно, и в межрегиональную экологическую катастрофу с появлением «мертвых» водных объектов, представляющих угрозу для людей и животных [7].

Такому ходу распространения негативных событий в АЗРФ способствует множество обстоятельств: большие пространства и хорошо развитая гидрографическая сеть, низкая устойчивость природной среды к антропогенным воздействиям, базирование в арктических регионах огромных стай перелетных птиц, переносящих загрязняющие и отравляющие химические вещества на большие расстояния от источника их образования, а также наблюдающееся изменение климата [5, 7–9]. Кроме образования новых водных объектов и переформирования гидрографической сети при оттаивании многолетней мерзлоты происходит освобождение депонированных в них опасных химических соединений и патогенных микроорганизмов [10–12], что в целом дополняет и усиливает действие антропогенного пресса. В результате подобного развития событий нельзя полностью исключить вероятность возникновения чрезвычайных ситуаций, вызванных невозможностью одновременно обеспечить выполнение намеченных планов хозяйственного освоения территорий и социально-экономическое развитие регионов.

Положительный водный баланс при существующем строении геологического фундамента и сложившемся рельефе привели к формированию в Арктической зоне огромных запасов пресной воды, которая сосредоточена в 1,77 млн рек, 2,5 млн озер,

а также в болотах, суммарная площадь которых составляет 20 % от площади АЗРФ [11–13]. Подавляющая часть пресноводных объектов АЗРФ относится к не охваченным наблюдениями малым водным объектам. Так, при наличии в АЗРФ 2,5 млн озер мониторинг осуществляется лишь на 8 крупных водоемах Европейской части и всего на 6 в Азиатской части [11]. Схожая ситуация и по наблюдениям на реках и болотах. Очевидно, что при таком положении с сетью наблюдений за жизненно важными пресными водами невозможно выполнить требования директивных органов об осуществлении хозяйственного освоения АЗРФ без нанесения непоправимого вреда окружающей среде. При большом числе источников антропогенного воздействия отсутствие специализированной системы контроля за состоянием пресных вод чревато опасными последствиями. Не дожидаясь их проявления в арктических регионах, в федеральных и региональных экологических программах по Арктике в качестве одной из первостепенных задач следует предусмотреть создание систем контроля за состоянием пресных вод в районах активного антропогенного воздействия.

Концептуальные основы системы контроля пресных вод АЗРФ

Проведение государственного мониторинга состояния природной среды является функцией Росгидромета. Накопленные огромные материалы многолетних наблюдений по всей стране и их согласованность с наблюдениями зарубежных стран представляют большую ценность для решения глобальных климатических и экологических проблем, а также проблем, вызванных нехваткой в мире питьевой воды [14]. Понимание необходимости взвешенного подхода к модернизации системы наблюдений нашло воплощение в Концепции совершенствования мониторинга окружающей среды², где рассмотрен важный вопрос перестройки государственной наблюдательной сети с учетом конкретных задач федерального, регионального и локальных уровней на 2017–2025 гг. (табл. 1). Однако остался без внимания не менее важный вопрос изменения программ наблюдений. Возможное число химических показателей нередко излишне, и требуются значительные затраты на их определение, в силу чего получение фактических данных об уровнях загрязнения окружающей среды становится часто неосуществимым. Также в Концепции отмечено, что «в обозримой перспективе маловероятно, что сложившаяся экономическая обстановка будет способствовать возложению на органы исполнительной власти субъектов Российской Федерации обязанности по созданию территориальных систем наблюдений». При такой постановке вопроса о работе территориальных систем вряд ли приходится рассчитывать на организацию наблюдений с момента начала серьезных антропогенных воздействий на пресные воды. В лучшем случае это произойдет, когда негативные изменения состояния пресных вод станут заметными и приблизятся к уровню регионального экологического кризиса. При этом отсутствие данных наблюдений за предшествующий период не позволит оценить темпы негативных изменений и осуществить превентивные меры для предотвращения катастрофических процессов.

Концепция мониторинга поверхностных пресных вод в условиях активного освоения АЗРФ должна заключаться в том, что запуск достаточно крупного промышленного предприятия необходимо сопровождать одновременным построением

² Приказ Росгидромета № 23 от 02 февраля 2017 г. «Об утверждении Концепции совершенствования системы мониторинга загрязнения окружающей среды с учетом конкретизации задач федерального, регионального и локального уровней на 2017–2025 годы».

Таблица 1

Распределение обязанностей между федеральной системой Росгидромета и системами регионального и локального уровней по оценке качества природных вод*

Table 1

Distribution of responsibilities between the federal system of Roshydromet and the systems of the regional and local levels for assessing the quality of natural waters*

Система наблюдений	Поставленные задачи
Государственная наблюдательная сеть	Оценка загрязнения окружающей среды, обусловленная последствиями глобального и межрегионального воздействия выбросов и сбросов загрязняющих веществ
Территориальные системы наблюдений	Оценка загрязнения окружающей среды, обусловленная последствиями регионального воздействия выбросов и сбросов загрязняющих веществ
Локальные системы наблюдений	Оценка загрязнения окружающей среды, обусловленная воздействием выбросов и сбросов загрязняющих веществ конкретными предприятиями

Примечание. * — таблица построена на материалах Приложения к приказу № 23 Росгидромета от 02 февраля 2017 г.

Note. * — the table is based on the materials of the Appendix to the Order No. 23 of the Federal Hydrometeorological Service dated February 02, 2017.

локальных и региональных систем контроля за экологическим состоянием пресных вод и началом их работы.

Особую опасность для пресных вод представляют выбросы загрязняющих веществ в атмосферу, так как в этом случае воздушными потоками они могут переноситься на значительные расстояния в сотни и более километров от источника образования с охватом химическими соединениями больших площадей [2, 3]. Так, аэротехногенный перенос загрязняющих веществ при промышленном освоении Арктической зоны приводит к серьезным негативным изменениям в экологическом состоянии и качестве воды озер [12]. Очевидно, что подобные изменения будут иметь место также в реках и болотах, т. е. целиком охватят все поверхностные водные объекты в АЗРФ. О серьезности аэротехногенного переноса свидетельствует, в частности, факт наличия только в Мурманской области более 4000 источников выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, 40 % которых не имеют очистных сооружений и являются непосредственной причиной образования локальных экологических кризисов в водных объектах [8]. Из-за низкого уровня технического оснащения государственной наблюдательной сети за загрязнением атмосферного воздуха только 7 % пунктов наблюдений осуществляет непрерывную регистрацию 12 % загрязняющих веществ от общего числа наблюдаемых в воздухе примесей [8]. Это еще раз подчеркивает необходимость создания системы контроля за состоянием пресноводных объектов, подверженных воздействию аэротехногенного переноса загрязняющих веществ, которое по своим масштабам существенно превышает воздействие сбросов сточных вод промышленными, сельскохозяйственными, коммунально-бытовыми и иными предприятиями. Основная угроза экологическому благополучию поверхностных водных объектов в АЗРФ от аэротехногенного переноса заключается в больших площадях распространения загрязняющих веществ при малой

интенсивности, низкой концентрации и большой продолжительности воздействия. В итоге в пресных водах возникает постоянная стрессовая реакция гидробионтов, охватывающая все звенья трофической цепи экосистемы.

Характерными особенностями аэротехногенного загрязнения пресных вод являются:

- 1) большая площадь охвата пресных вод;
- 2) одновременное присутствие в воде многих химических веществ с низкой концентрацией;
- 3) присутствие токсических веществ;
- 4) малая интенсивность загрязнения и продолжительное хроническое воздействие на пресные воды;
- 5) высокая степень неопределенности аэротехногенного воздействия, смена скорости и направления переноса загрязняющих веществ;
- 6) наличие зон с различным уровнем загрязнения: наименее опасная — вблизи источника выбросов, наиболее опасная — вдоль границы ареала загрязнения;
- 7) недооценка уровня опасности и масштабов аэротехногенного загрязнения.

Результаты многолетних исследований отечественных и зарубежных гидробиологов убедительно показали, что многие химические вещества в малых концентрациях проявляют значительно большее воздействие на живые организмы, чем при высоких концентрациях [15–16]. Однако при существующем в стране природоохранном положении даже обнаружение диоксинов [15] в водном объекте при концентрациях ниже ПДК не будет основанием для признания природоохранными органами пресных вод вредными для человека и животных. Дополнительную опасность для живых организмов представляет одновременное присутствие в воде различных химических веществ низкой концентрации. Это может приводить к непредсказуемым экологическим последствиям. Несмотря на убедительность обоснований, такое заключение требует серьезной экспериментальной проверки, которая до сих пор не проводилась.

Характер аэротехногенного загрязнения зависит от скорости и направления движения воздушных масс. В подавляющем большинстве случаев вблизи источника выбросов выпадают наиболее тяжелые и наименее опасные твердые загрязняющие вещества, а наиболее опасные — мелкодисперсная пыль, полужидкие и жидкие токсичные вещества — достигают границ ареала площади охвата [8]. Отмеченные обстоятельства делают задачу построения системы контроля состояния пресных вод необычайно сложной и требующей нестандартного подхода. При этом за счет хорошо развитой гидрографической сети зона распространения загрязняющих веществ в пресных водах может существенно превышать границы района их выпадения из атмосферы. Важно заблаговременно информировать региональные природоохранные структуры о приближении к критическому уровню состояния пресноводных объектов, после пересечения которого они перестанут быть экологически безопасными и будут иметь ограничения в их использовании. Чтобы не допустить последующего кризиса, потребуется проведение определенных превентивных мероприятий, таких как модернизация на предприятиях производственных процессов или очистных сооружений, а в отдельных случаях снижение темпов развития промышленных предприятий. Хотя подобные мероприятия являются с организационной и технологической позиции достаточно сложными и дорогостоящими, вместе с тем их реализация потребует значительно меньших усилий и средств, чем устранение по-

следствий возникшей кризисной экологической ситуации. Заметим, что в отдельных арктических регионах образование масштабных по площади кризисных экологических ситуаций происходит за счет воздушного переноса загрязняющих веществ от промышленных предприятий других сопредельных регионов или даже зарубежных стран [5, 8]. В этих случаях превентивные меры будут заключаться в установлении истинного виновника негативных последствий и заключении с ним соглашения об осуществлении действий, направленных на снижение антропогенной нагрузки на поверхностные воды пострадавшего региона. В дополнение подчеркнем, что по своей единственной функциональной обязанности — заблаговременно информировать природоохранные органы о приближении пресных вод к кризисному состоянию — предлагаемая система контроля относится к разряду сигнальных, а по поставленной перед ней целевой установке — обеспечение возможности своевременного принятия решения о проведении превентивных мероприятий во избежание огромных социально-экономических потерь — она имеет, несомненно, стратегическое предназначение.

При создании системы контроля за состоянием пресных вод в условиях постоянного антропогенного воздействия разумным представляется воспользоваться богатым научно-методическим и практическим опытом работы системы мониторинга поверхностных вод Росгидромета. Предлагаемый автором подход опирается на тот факт, что следствием антропогенного воздействия на пресные воды являются нарушения баланса содержащихся в них загрязняющих и биогенных веществ, а также продукционно-деструктивных процессов в экосистемах, которые в итоге приводят к ускоренному развитию негативных внутриводоемных процессов: антропогенного эвтрофирования, закисления, загрязнения тяжелыми металлами и биогенными веществами, токсификации. Эти процессы давно и успешно изучаются учеными [5, 17]. Установленные пространственные закономерности изменения состояния пресных вод, а также интегральные характеристики параметризации, отражающие изменения их состояния во времени, позволяют сформулировать методологический подход к созданию системы контроля за состоянием пресных вод АЗРФ.

Основные методологические положения системы контроля пресных вод

Методология создания системы наблюдений за экологическим состоянием пресных вод должна быть адекватной сложности азротехногенного загрязнения и негативных внутриводоемных процессов. Перед тем как перейти к ее рассмотрению, дадим представление об оптимальной или, более правильно, рациональной системе контроля пресных вод (табл. 2). Оно основано на собственных представлениях автора о сложностях работы в Арктической зоне, трудностях с коммуникациями и доступом к водным объектам, большой рассредоточенности водных объектов и ограниченных кадровых, технических и финансовых возможностях природоохранных органов. Система наблюдений должна строиться на малозатратных подходах и доступных методах и средствах измерений и обработке данных при максимальном стремлении к получению вполне приемлемой информации об экологическом состоянии водных объектов на контролируемой территории. Размещение сети пунктов наблюдений должно базироваться на принципах ландшафтно-гидрологического районирования контролируемой территории, а состав сигнальных показателей — на интегральных характеристиках внутриводоемных негативных процессов и их параметризациях.

Таблица 2

Основные требования к рациональной сигнальной системе
контроля экологического состояния поверхностных водных объектов
на территории Арктической зоны РФ

Table 2

Basic requirements for a rational signalling system for controlling the ecological state
of surface bodies of water in the Arctic zone of the Russian Federation

Полнота информации	Получение полноценной диагностической информации об основных негативных внутриводоемных процессах
Надежность информации	Достаточная чувствительность методов и средств для выявления значимых изменений в развитии негативных внутриводоемных процессов
Стабильность работы системы	Гарантия слабой вариабельности результатов при повторных определениях
Оптимальность системы	Минимально необходимое и достаточное число показателей, включая биотесты и биоиндикаторы, а также количество пунктов их определения для оперативного ответа на вопрос об экологической безопасности пресных вод
Устойчивость системы	Возможность использования методов и средств во всех арктических регионах
Доступность системы	Возможность применения методов и средств специалистами и подготовленными волонтерами
Экономичность системы	Направленность на обеспечение экологической безопасности вод при доступных финансовых и трудовых затратах
Интерпретация информации	Понятна представителям природоохранных органов и лицам, принимающим управленческие решения, общественным организациям
Перспективы развития системы контроля	Автоматизированная природоподобная технология контроля на основе использования биообъектов, «умных» технических систем и беспилотных летательных аппаратов

Методология размещения сети пунктов наблюдений

Состояние водных объектов во многом определяется физико-географическими условиями. Водные объекты, находящиеся в однородном ландшафтно-гидрологическом районе, при отсутствии антропогенного пресса имеют идентичный ход развития, а полученные для ряда водных объектов тенденции изменения их состояния являются типичными для большинства остальных объектов [5, 8, 10, 11]. Это позволяет при построении сети пунктов наблюдений сигнальной системы контроля в АЗРФ воспользоваться методом аналогии, основанном на использовании реперных (репрезентативных) объектов. Если контролируемая территория является достаточно большой, то в силу ее размеров на ней могут встречаться разнообразные природные условия и ландшафты, для которых характерна разная устойчивость и реакция на постоянное антропогенное воздействие. Очевидно, что в подобных случаях опираться на данные только одного реперного водного объекта недостаточно и здесь могут потребоваться несколько объектов. При выполнении ландшафтно-гидрологического районирования можно воспользоваться методологическим подходом, использованным в работе [13].

Методология выбора сигнальных показателей системы контроля

Сигнальная система стратегического контроля не предназначена для решения научно-прикладных задач, и, кроме того, она должна быть экономически оправданной и ориентированной на четко обозначенную цель и конкретного потребителя — региональные природоохранные органы и лиц, принимающих управленческие решения. Важно то, что основные закономерности образования, формирования и развития негативных внутриводоемных процессов, а также ход вызванных ими социально-экономических последствий в основных чертах могут быть описаны с помощью небольшого числа интегральных показателей и параметризаций.

Концепция параметрического подхода впервые была применена Институтом озероведения РАН при создании системы ранней диагностики кризисных экологических ситуаций на урбанизированных водоемах Санкт-Петербурга [18]. Система была опробована на 240 естественных и искусственных водоемах, и в силу своей высокой оперативности, эффективности и рентабельности она получила широкое распространение в регионе и стала определяющей в деятельности природоохранных органов города при отборе ими первоочередных водоемов для осуществления на них необходимых для улучшения экологической ситуации работ по рекультивации. Позднее система ранней диагностики была рекомендована для работ на малых озерах. Есть основания ожидать, что набор сигнальных показателей, используемый в системе ранней диагностики, окажется вполне приемлемым и для системы контроля озер АЗРФ. Основанием для такого предположения служат установленные общие причины и закономерности возникновения и развития негативных внутриводоемных процессов на Северо-Западе РФ и в Арктической зоне. Уточнения, учитывающие особенности водных объектов АЗРФ, можно ввести путем параметризации. Необходимо проведение апробации на пресных водах отдельных арктических регионов имеющих показатели системы ранней диагностики, а потом по полученным результатам — корректировки с возможной заменой отдельных показателей и дополнением набора новыми показателями.

Биотестирование и биоидентификация токсичных пресных вод

Указанные ранее негативные экологические внутриводоемные процессы могут протекать как без, так и с достижением уровня токсичности воды. Поэтому в системе контроля пресных вод АЗРФ необходимо обязательно иметь показатель общей токсичности воды. В России, как и во многих других странах, в системах контроля вод осуществляется оценка их общей токсичности с использованием в качестве тест-объектов гидробионтов — рыб, водорослей, дафний, инфузорий и т. д. Наибольшее распространение среди них получили *Daphnia magna*, *Chlorella vulgaris*, *Paramecium caudatum*, которых легко культивировать в лабораторных условиях. Ветвистоусый рачок *Daphnia magna*, обладающий высокой чувствительностью ко многим загрязняющим веществам, был включен в систему ранней диагностики кризисных экологических ситуаций уже после ее опубликования. Вполне естественно этот тест-объект внести и в систему контроля пресных вод для выявления их общей токсичности, тем более что дафнии используются природоохранными органами во всех арктических регионах.

Вместе с тем установление факта интегральной токсичности воды является необходимым, но не всегда достаточным условием для выявления и привлечения к ответственности виновного в этом предприятия, особенно когда контролируемая территория

подвергается одновременному воздействию нескольких предприятий. При наличии официальной информации от предприятий о спектре образующихся на них классов токсичных загрязняющих веществ природоохранным органам потребуются данные, подтверждающие их присутствие в пресных водах контролируемой территории. Только это дает им основание предъявить одному, а возможно, и всем предприятиям обоснованное обвинение в нарушении экологического благополучия пресноводных объектов и выдвинуть предписания о необходимости принятия мер по снижению токсического воздействия на пресные воды. Для выявления состава загрязняющих веществ, вызывающих общую токсичность пресных вод в АЗРФ, полезными могут быть результаты многолетних исследований, выполненных в 1990–2000-х гг. Институтом озероведения РАН по разработке методов биоидентификации классов ксенобиотиков [19]. В качестве тест-объекта использовались *Daphnia magna*, а мишенью для оценки биохимического воздействия служили рецепторы их нервной системы. На первом этапе были детально изучены особенности реакции мишени на воздействие различных классов ксенобиотиков. Выявленные особенности реакции позволили на втором этапе исследований воспользоваться широко распространенным в медицине подходом, заключающимся в подборе на лабораторных тест-объектах — мышах и крысах — фармакологических препаратов, т. н. антидотов, усиливающих или ослабляющих биохимическое токсическое действие ксенобиотиков на мишень. Выполненные Институтом озероведения РАН исследования применительно к *Daphnia magna* с использованием различных фармакологических препаратов в качестве антидотов позволили разработать общий подход к биоидентификации классов ксенобиотиков. Опираясь на него, с помощью подбора соответствующих фармакологических средств — антидотов были созданы методы биоидентификации в воде следующих классов загрязняющих веществ [19]: хлорорганических соединений, фторорганических соединений, карбаматов, пестицидов класса пиретроидов, солей тяжелых металлов. Эти классы загрязняющих веществ отличаются высокой токсичностью, широким распространением в пресных водах, способностью к биоконцентрированию и избирательностью действия. Поэтому включение разработанных методов биоидентификации станет важным замыкающим звеном в предлагаемой системе контроля пресных вод АЗРФ. Это позволит в течение 12 часов определить наличие в воде названных классов опасных загрязняющих веществ без сложного аналитического оборудования [20]. Методы биоидентификации дают возможность не только установить основного виновника токсичности воды, но и оценить, насколько надо снизить на предприятии выбросы в атмосферу химических веществ совершенно конкретного класса опасности, что крайне важно в случае необходимости работ по модернизации.

Заключение

Подводя общий итог, следует отметить, что использование реперных водных объектов, выбранных исходя из особенностей ландшафтно-гидрологического районирования территории, в сочетании с применением интегральных характеристик, дающих обобщенное представление о возникновении и развитии внутриводоемных экологических кризисов и их последствиях, позволяет в принципе создать мало-затратную систему контроля пресноводных водоемов. Такая система обеспечит возможность получать информацию о возникновении чрезвычайных ситуаций на водных объектах АЗРФ. При этом даже самая современная диагностическая система полностью не исключает возможности получения неправильного вывода.

Последний в случае ошибочного проведения превентивных мероприятий станет причиной неоправданно больших средств и трудозатрат, а необоснованный отказ от их осуществления повлечет за собой экологический кризис в пресных водах. Чтобы снизить вероятность принятия ошибочного вывода вполне резонным будет проведение дополнительной разовой контрольной проверки на нескольких реперных водных объектах с использованием более широкого набора сигнальных показателей и с применением современного лабораторного аналитического оборудования.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Государственное задание СПб НЦ РАН от 27 декабря 2023 г. № 075-00611-24-00 на 2024 г. и на плановый период 2025 и 2026 гг.

Competing interests. The author declares no conflict of interest.

Funding. State assignment of the St. Petersburg Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, December 27, 2023 No. 075-00611-24-00 for 2024 and for the planning period 2025 and 2026.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Лаверов Н.П. Васильев В.И., Макоско А.А. *Научно-технические проблемы освоения Арктики*. М.: Российская академия наук; 2015. 490 с.
2. Молчанов В. П., Акимов В. А., Соколов Ю. И. *Риски чрезвычайных ситуаций в Арктической зоне Российской Федерации*. М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС; 2011. 300 с.
3. Котова Е.И., Коробов В.Б., Павленко В.И. Экстремальные загрязнения на территории Арктической зоны РФ: случаи и анализ. *Проблемы региональной экологии*. 2018;1:67–72.
Kotova E.I., Korobov V.B., Pavlenko V.I. Extreme pollution in the Arctic zone of the Russian Federation: cases and analyses. *Regional environmental issues*. 2018;1:67–72. (In Russ.)
4. Ноговицын Р.Р. Васильева А.М. Обеспечение экологической безопасности в Арктической зоне Российской Федерации. *Проблемы современной экономики*. 2018;4(68):203–205.
Nogovitsyn R.R., Vasiljeva A.M. Ensuring the ecologic security in the Arctic zone of the Russian Federation (Russia, Yakutsk, Moscow). *Problems of modern economics*. 2018;4(68):203–205. (In Russ.)
5. Моисеенко Т.И., Яковлев В.А. *Антропогенные преобразования водных экосистем Кольского Севера*. Л.: Наука; 1990. 221 с.
6. Безматерных Ф.Н., Пузанов А.В., Котовщиков А.В., Толонеев А.П. Гидрохимические показатели качества воды Норило-Пясинской озерно-речной системы после разлива дизельного топлива на ТЭЦ-3 г. Норильска в 2020 г. *Сибирский экологический журнал*. 2021;28(4):408–422. <https://doi.org/10.15372/SEJ20210402>
Bezmaternykh D.M., Puzanov A.V., Kotovshchikov A.V., Drobotov A.V., Tolomeev A.P. Hydrochemical indicators of water quality in the Norilsk-Pyasino lake-river system after a diesel fuel spill at Norilsk heat and power plant 3 in 2020. *Contemporary problems of ecology*. 2021;14(4):323–334. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/SEJ20210402>
7. Ревич Б.А. Риски здоровью населения в «горячих» точках от химического загрязнения Арктического макрорегиона. *Проблемы прогнозирования*. 2020;2(179):148–157.
Revich B.A. Population health risks in the chemical pollution hotspots of the Arctic macroregion. *Studies on Russian economic development*. 2020;31(2):238–255. <https://doi.org/10.1134/S1075700720020100>
8. Кашулин Н.А., Денисов Д.Б., Валькова С.А., Вандыш О.И., Терентьев П.М. Современные тенденции изменений пресноводных экосистем Евро-Арктического региона. *Труды Кольского НЦ РАН*. 2012;3(10):7–54.

- Kashulin N.A., Denisov D.B., Valkova S.A., Vandyshe O.I., Terentjev P.M. The modern tendencies of modification of fresh water ecosystems of the Euro-Arctic region. *Transactions of the Kola Science Centre of RAS*. 2012;3(10):7–54. (In Russ.)
9. Никаноров А.М., Брызгалов В.А., Косменко Л.С., Даниленко А.О. *Реки материковой части Российской Арктики*. Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального ун-та; 2016. 275 с.
10. Никаноров А. М., Иванов В. В., Брызгалов В. А. *Реки Российской части Арктики в условиях современного антропогенного воздействия*. Ростов-на-Дону: Изд-во НОК; 2007. 280 с.
11. Румянцев В.А., Измайлова А.В., Макаров А.С. Состояние озерного фонда Арктической зоны Российской Федерации. *Вестник Российской академии наук*. 2021;91(2):115–126. <https://doi.org/10.31857/S0869587321020079>
- Rumyantsev V.A., Izmailova A.V., Makarov A.S. Status of the lake fund of the Arctic zone of the Russian Federation. *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2021;91(1):26–36. <https://doi.org/10.1134/S101933162101007X>
12. Никонов В.В., Моисеенко Т.И., Лукина Н.В. (ред.) *Структура и функции наземных и водных экосистем Севера в условиях антропогенного воздействия*. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН; 1990. 130 с.
13. Румянцев В.А., Измайлова А.В. Районирование Арктической зоны РФ как основа разработки системы наблюдений за пресными водами. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2022;68(2):173–190. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-2-173-190>
- Rumyantsev V.A., Izmailova A.V. Zoning of the Arctic zone of the Russian Federation as the basis for developing a freshwater observation system. *Arctic and Antarctic Research*. 2022;68(2):173–190. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-2-173-190>
14. *Вода Арктики: запас на будущее. Почему водные ресурсы Арктической зоны России становятся серьезным экономическим активом*. Инвестиционный портал Арктической зоны России. 27 сентября 2020. URL: <https://arctic-russia.ru/article/voda-arktiki-zapas-na-budushchee/> (дата обращения: 14.02.24).
15. Дмитриева А.Г. Роль низких концентраций загрязняющих веществ при оценке экологических рисков. В кн.: *Биоиндексация в мониторинге пресноводных экосистем. II*. СПб.: Изд-во «Любавич»; 2011. С. 12–13.
16. Сазанов Л.А., Зайцев С.В. Действие сверхмалых доз (10^{-18} — 10^{-14}) биологически активных веществ: общие закономерности, особенности и возможные механизмы. *Биохимия*. 1992;57(10):1443–1460.
- Sazanov L.A., Zaitsev S.V. Effects of ultra-low (10^{-18} — 10^{-14}) doses of biologically active compounds: general regularities, peculiarities, and possible mechanisms. *Biochemistry*. 1992;57(10):1443–1460. (In Russ.)
17. Моисеенко Т.И., Гашкина Н.А. *Формирование химического состава вод озер в условиях изменения окружающей среды*. М.: Наука; 2010. 288 с.
18. Румянцев В.А., Игнатъева Н.В. *Система ранней диагностики кризисных экологических ситуаций на водоемах*. СПб.: ВВМ; 2006. 149 с.
19. Загребин А.О., Румянцев В.А., Тонкопий В.Д. Разработка методов биоидентификации ксенобиотиков для оценки качества вод. *Водные ресурсы*. 2018;43(1):92–96. <https://doi.org/10.7868/S0321059616010181>
- Zagrebina A.O., Rumyantsev V.A., Tonkopi V.D. Developing methods for bioidentification of xenobiotics for water quality assessment. *Water resources*. 2016;43(1):141–144. <https://doi.org/10.1134/S0097807816010164>
20. Амирова З.К., Кулагин А.А. *Стойкие органические соединения в атмосферном воздухе урбанизированных территорий*. Уфа: БГПУ имени М. Акмуллы; 2017. 224 с.

ГЛЯЦИОЛОГИЯ И КРИОЛОГИЯ GLACIOLOGY AND CRYOLOGY OF THE EARTH

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-2-222-237>

УДК 551.343+551.435.627



Факторы активизации термоденудации и активность термоцирков на Центральном Ямале в 2010–2018 гг.

А.В. Хомутов¹✉, Е.А. Бабкина¹, Р.Р. Хайруллин², Ю.А. Дворников^{3,4}

¹ Институт криосферы Земли Тюменского научного центра СО РАН, Тюмень, Россия

² ООО «b.geos», Корнойбург, Австрия

³ Лаборатория Smart Urban Nature, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

⁴ Лаборатория карбомониторинга наземных экосистем, Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пушкино, Россия

✉ artcryo@yandex.ru

ABX, 0000-0001-8855-3483; ЕАБ, 0000-0002-1426-6091; PPX, 0000-0002-4948-8938;
ЮАД, 0000-0003-3491-4487

Аннотация. Рассмотрены климатические факторы активизации термоденудационных процессов, приводящих к образованию термоцирков, в центральной части полуострова Ямал. На основе сопоставления разновременных дистанционных материалов, сопровождавшегося анализом климатических данных, проведен анализ активности термоцирков в период 2010–2018 гг. Помимо «классических» термоцирков, характеризующихся в анализируемый временной период разной степенью активности, выделено существенное количество эмбриональных термоденудационных форм.

Ключевые слова: изменение климата, многолетнемерзлые породы, подземный лед, полуостров Ямал, сезонное протаивание, термоденудация, термоцирк

Для цитирования: Хомутов А.В., Бабкина Е.А., Хайруллин Р.Р., Дворников Ю.А. Факторы активизации термоденудации и активность термоцирков на Центральном Ямале в 2010–2018 гг. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2024;70(2):222–237. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-2-222-237>

Поступила 03.12.2023

После переработки 02.05.2024

Принята 08.05.2024

Factors of thermal denudation activation and thermocirques activity on central Yamal in 2010–2018

Artem V. Khomutov¹✉, Elena A. Babkina¹, Rustam R. Khairullin²,
Yury A. Dvornikov^{3,4}

¹ Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Centre, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tyumen, Russia

² b.geos GmbH, Korneuburg, Austria

³ Smart Urban Nature Laboratory, Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia

⁴ Laboratory of Carbon Monitoring in Terrestrial Ecosystems, Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science of the Russian Academy of Sciences, Pushchino, Russia

✉artcryo@yandex.ru

AVK, 0000-0001-8855-3483; EAB, 0000-0002-1426-6091; RRK, 0000-0002-4948-8938; YAD, 0000-0003-3491-4487

Abstract. The paper presents research findings of the climatic factors responsible for the activation of thermal denudation processes leading to the formation of thermocirques in the central part of the Yamal Peninsula in the north of West Siberia. Based on a comparison of multi-temporal remote sensing (2010, 2013 and 2018) coupled with climate data, an analysis of the thermocirques activity in 2010–2018 was carried out. Thermocirques are specific topographic forms that arise because of the activation of cryogenic earth flows, the formation of which is caused by an increased seasonal thawing of the upper part of the ground ice on the slopes as compared to the previous years. Analysis of the monitoring data showed that in 2012 and 2013 all the types of surfaces are characterized by a significant increase in seasonal thawing compared to the previous period 1993–2011 (12 % increase on slopes), due to the summer air temperature, the amount of summer precipitation and the increased duration of the warm period. The results of the thermocirques activity analysis are shown on a map. The results of this local study were compared with those of a regional (Yamal and Gydan Peninsulas) remote sensing study of thermocirques. This showed a higher accuracy of the local study based on field monitoring and very-high-resolution satellite imagery. The analysis of the thermocirques activity showed that 1) over the period from 2010 to 2018 thermal denudation activity in the study area increased due to the anomalous climatic conditions in the spring-summer season of 2012, and then gradually decreased; 2) in addition to “classical” thermocirques, which were at different stages of activity in the time periods analyzed (2010, 2013 and 2018), a significant number of embryonic thermocirques were identified. Such thermocirques, just as the majority of small “classical” thermocirques, can only be identified on very-high-resolution satellite imagery.

Keywords: climate change, ground ice, permafrost, seasonal thawing, thermal denudation, thermocirque, Yamal Peninsula

For citation: Khomutov A.V., Babkina E.A., Khairullin R.R., Dvornikov Y.A. Factors of thermal denudation activation and thermocirques activity on central Yamal in 2010–2018. *Arctic and Antarctic Research*. 2024;70(2):222–237. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-2-222-237>

Received 03.12.2023

Revised 02.05.2024

Accepted 08.05.2024

Введение

Широкое распространение термоденудационных форм рельефа связано с воздействием как тепла, так и морских волн на неглубоко залегающие пластовые льды, и достаточно хорошо изучено [1, 2]. Важное место среди исследований криолитозо-

ны Арктики занимают вопросы, касающиеся устойчивости многолетнемерзлых пород в условиях меняющегося климата, в том числе при проявлении термоденудационных процессов [1, 3–5 и многие др.]. В евразийской и североамериканской Арктике с начала текущего столетия в связи с климатическими колебаниями отмечается активизация темпов термоденудации и термоабразии, связанных с вытаиванием залежеобразующих подземных льдов [6–10], а также сопутствующих криогенных процессов в парагенезе с термоденудацией: термоэрозии, термокарста, криогенного оползания, солифлюкции, пучения и др. [2, 11]. Проявление термоденудационных процессов выражается в деформации поверхности и образовании отрицательных форм рельефа — термоцирков [1, 12, 13]. Установлено, что скорость отступания бровок термоцирков зависит от поступления летнего тепла, а также от льдистости геологического разреза [14–16]. Повышение температуры воздуха определяет скорость оттаивания льда и мерзлых пород в береговых уступах [1, 7 и др.], приводит к увеличению глубины протаивания и к последующему достижению сезонным протаиванием кровли пластовых льдов на склонах, что приводит к зарождению термоцирков [14, 17]. Результаты наблюдений на берегах Карского моря свидетельствуют о том, что высокие скорости разрушения берегов в 2007–2010 гг. связаны с активизацией термоденудации [4, 18]. Поскольку в разрушении морских берегов принимает участие и волновая деятельность, снижение ледовитости Карского моря также должно резко повысить скорости разрушения берегов. Совместный анализ полевых наблюдений и данных дистанционного зондирования позволил определить скорости роста термоцирков на о. Колгуев (Баренцево море) в 2009–2012 гг., достигавшие 14,5–15,1 м/год при средних скоростях около 2,6 м/год [12], и это при относительно невысокой толщине ледяных тел в береговых обрывах.

На формирование термоцирков, а также их дальнейшее развитие оказывает влияние изменение климатических характеристик. Например, в канадской Арктике в центральной части дельты р. Маккензи спрогнозировано увеличение темпов роста термоцирков в местах повышенной льдонасыщенности с учетом возрастания скоростей роста термоцирков в 1973–2004 гг. в 1,4 раза по сравнению с предыдущим периодом 1950–1973 гг. [19].

Недавняя активизация термоденудации за пределами береговой зоны [13] обозначила вопрос изучения динамики поверхности термоцирков, условий их активизации или, наоборот, стабилизации и зарастания в совершенно иной обстановке относительно термоцирков, развивающихся непосредственно на морских побережьях. Решение этого вопроса, уточнение характера развития термоденудационных процессов, связанных с формированием специфических форм рельефа — термоцирков, на континентальных арктических равнинах Карского региона в глубине суши является отдельной актуальной задачей.

В этой статье рассмотрены климатические факторы активизации термоденудационных процессов, приводящих к образованию термоцирков, и проведен анализ активности термоцирков в период 2010–2018 гг. в центральной части полуострова Ямал.

Район работ

В 2012–2013 гг. в центральной части полуострова Ямал в окрестностях научно-исследовательского стационара «Васькины Дачи» (рис. 1а) зафиксировано массовое формирование термоцирков. На рис. 1б представлен наиболее крупный термоцирк, наблюдавшийся во время проведения исследования, а на рис. 1в — термоцирк, характеризовавшийся двумя активными стадиями с 2012 и с 2016 г., разделенными стадией зарастания (согласно полевым наблюдениям в 2013–2019 гг.).

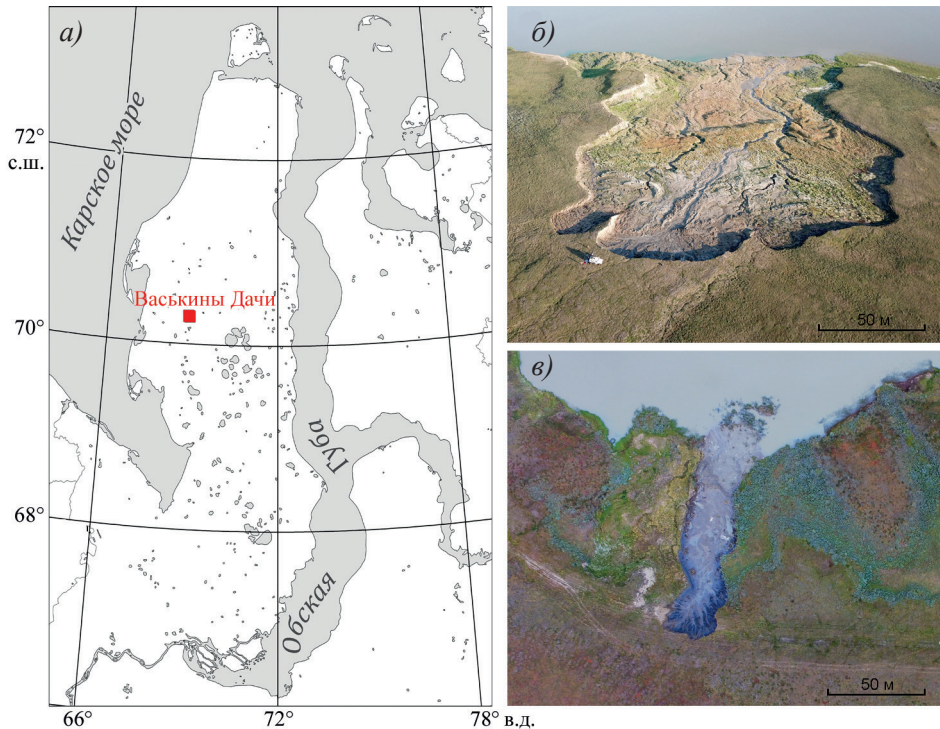


Рис. 1. Местоположение научно-исследовательского стационара «Васькины Дачи» на полуострове Ямал (а), примеры термоцирков — ТЦ-1 (фото А.В. Хомутова с применением БПЛА, август 2019 г.) (б) и ТЦ-4,4а (фото А.В. Хомутова с применением БПЛА, август 2017 г.) (в)
 Fig. 1. Location of research station “Vaskiny Dachi” on the Yamal Peninsula (a), examples of thermocirques — TC-1 (photo by A.V. Khomutov using UAV, August 2019) (b) and TC-4,4a (photo by A.V. Khomutov using UAV, August 2017) (c)

Район работ расположен на междуречье рек Се-Яха и Морды-Яха и представляет собой холмисто-увалистую равнину с узкими водоразделами и длинными пологими склонами, расчлененную узкими долинами малых рек и водотоков, овражно-балочной сетью, озерами и хасырями. Глубина расчленения казанцевской и салехардской равнин достигает 40–50 м. Около 60 % территории занято пологими склонами крутизной до 7°, склоны крутизной от 7 до 50° занимают около 10 % площади, а оставшиеся 30 % приходятся на вершинные части увалов, поймы рек и озера. На водораздельных поверхностях активно морозобойное растрескивание пород с образованием повторно-жильных льдов на торфяниках, распространенных в седловинах, и песчаных и песчано-ледяных жил на вершинах. В криолитологическом строении принимают участие песчаные породы со значительным содержанием пылеватых частиц. Склоновые отложения характеризуются песчаным составом вблизи бровки. Вниз по склону они сменяются супесчаными и суглинистыми, а подстилаются глинистыми породами. Важнейшим компонентом криогенного строения являются пластовые льды, которые распространены практически повсеместно и на изучаемой территории вскрывались на глубинах от 4 до 25 м скважинами при проведении изысканий для строительства ж/д линии

Обская–Бованенково. Активное развитие склоновых процессов характерно для останцов морских террас, сложенных высокольдистыми породами с залежами пластовых льдов [14].

Глубина сезонного протаивания в среднем не превышает 1,5 м на слабозадернованных поверхностях вершин с песчаными породами и сильнозадернованных поверхностях с высокими кустами и 0,9–1,0 м на задернованных поверхностях плоских водоразделов и склонов преимущественно с суглинистыми породами [17]. Средняя годовая температура пород на подошве сезонно-талого слоя изменяется от положительных значений на сильнозадернованной поверхности с высокими кустами до $-5,2^{\circ}\text{C}$ на незадернованной вершинной поверхности. На глубине 10 м в скважине на незадернованной поверхности с песчаными породами с 2011 по 2018 г. средняя годовая температура пород увеличилась с $-6,2$ до $-5,6^{\circ}\text{C}$. Территория вокруг стационара «Васькины Дачи» достаточно давно известна как опорный ключевой участок для изучения термоденудационных процессов [20]. Однако до 2013 г. основное внимание уделялось изучению криогенных оползней скольжения, связанных с формированием льдистого горизонта на подошве сезонно-талого слоя [14, 21, 22].

Методы исследования

Для проведения анализа активности термоцирков применен комплекс методов, включающих как непосредственные наблюдения в полевых условиях, так и интерпретацию данных дистанционного зондирования.

Активность термоцирков по территории исследования анализировалась на основе космических снимков сверхвысокого пространственного разрешения (от 0,41 до 0,61 м) нескольких съемочных систем за разные годы: QuickBird-2 за 30 июля 2010 г., GeoEye-1 за 5 июля 2013 г., WorldView-2 за 21 июля 2013 г. (Digital Globe Foundation©) и WorldView-2, 3 за 10 июля 2018 г.

При уточнении дешифровочных признаков анализируемых термоцирков для некоторых из них использованы материалы БПЛА-съемки — ортофотопланы, фактически являющиеся аналогами космических снимков с еще более сверхвысоким пространственным разрешением, но на значительно меньшие участки интереса. Построение ортофотопланов производилось в ПО Agisoft Metashape на основе изображений с камеры, установленной на беспилотном летательном аппарате. Обработка данных дистанционного зондирования, ортофотопланов и векторных геоданных проводилась в ПО ArcGIS.

Объекты дешифрировались исходя из наличия детальных материалов полевых исследований, в том числе ортофотопланов, на ключевые и другие эпизодически посещаемые термоцирки, по методу подобия спектральных характеристик на имеющихся космических снимках.

Климатическая составляющая активизации и последующего развития термоденудации, приводящей к образованию термоцирков, анализировалась с использованием данных о средней годовой температуре воздуха, о суммах летних температур (индекса оттаивания), о суммах зимних температур (индекса промерзания), о суммах летних и зимних атмосферных осадков по данным ближайшей метеостанции Марресале [23]. Используются данные многолетнего мониторинга глубины протаивания многолетнемерзлых пород в районе стационара [17], в том числе полученные авторами.

Результаты

Климатические колебания второго десятилетия текущего столетия, включая экстремально теплую в изучаемом районе весну 2012 г., лето 2013 г., а в дальнейшем и частично лето 2016 г. [13, 23], привели к массовой активизации криогенных оползней течения, причиной формирования которых является достижение сезонным протаиванием кровли пластовых льдов на склонах и повышенное по сравнению с предыдущими годами протаивание верхней части залежи этого льда [14].

Как показал анализ данных мониторинга глубины протаивания [17] в 2012 и 2013 гг., все типы поверхностей характеризуются значительным увеличением глубины протаивания по сравнению с предыдущим периодом 1993–2011 гг. (от 12 % на склоновых до 20 % на вершинных поверхностях). А в 2016 г. произошло еще более резкое увеличение глубины протаивания (на величину от 24 до 37 %) относительно периода 1993–2011 гг.

Такие изменения связаны в основном с ростом летней температуры воздуха, с увеличением количества летних осадков, а также с увеличением продолжительности теплого периода. В 2012 и 2016 гг. отмечены как самые высокие суммы положительных температур, самые большие суммы летних осадков, так и самые продолжительные периоды с положительной среднесуточной температурой воздуха (табл. 1). Кроме того, в летние периоды 2012 и 2016 гг. и в предваряющие их зимние периоды совпали благоприятные условия для формирования более высокой, чем когда-либо за период наблюдений, глубины протаивания и активизации криогенных оползней течения. Фактически в 2012 г. теплый период начался 28 мая, при этом с самого начала наблюдалась нетипично высокая температура воздуха [23].

Так как минимальная глубина залегания пластовых льдов, вскрывающихся в стенках термоцирков, по нашим наблюдениям, составляет 2 м, при определенных условиях на склонах, в частности в условиях морозобойного растрескивания поверхности, эта глубина может быть достигнута сезонным протаиванием в наиболее теплые годы. Это и произошло в 2012 г. [13]. В 2016 г. не отмечено массового повторения этого явления и возникновения большого числа новых криогенных оползней течения, а затем термоцирков. Скорее всего, это связано с меньшим количеством летних осадков, а все склоны, потенциально благоприятные для развития процесса, были уже разгружены в 2012 г. Подобная ситуация была в 1989–1990 гг., когда в 1989 г. произошел массовый сход криогенных оползней скольжения [14, 21], а в более теплое 1990 г. повторения оползания не было, так как склоны уже разгрузились.

После формирования криогенных оползней течения климатические факторы (метеорологические параметры) начинают действовать на мерзлую стенку отрыва термоцирка напрямую. К такому воздействию относится влияние солнечной радиации и атмосферных осадков на лишенную изолирующего растительного слоя поверхность подземного льда либо сильнольдистой многолетнемерзлой породы. Тем самым определяется скорость развития термоцирка на фоне других влияющих условий, в которых развивается термоцирк (экспозиция склона, мощность залежи подземного льда, тип подземного льда и т. д.).

Очевидно, что процессы термоденудации, как и другие процессы, характерные для криолитозоны с подземными льдами, развиваются на протяжении всего времени после формирования подземных льдов. При этом на общие климатические тренды накладываются местные микроклиматические, литологические и другие факторы.

Table 1

Климатические факторы активности термоцирков, по данным м/с Марресале [23] и ежегодного мониторинга

Climatic factors of thermocirques activity, based on datasets of the Marresale weather station [23] and annual monitoring

Годы	$T_{\text{возд.год}},$ °C	Теплый период								Холодный период		
		Глубина протаивания, см		Индекс оттаивания, градусо-дни		Продолжи- тельность, дни		Сумма летних осадков, мм		Годы	Индекс промерзания, градусо-дни	Сумма зимних осадков
		Вершины	Склоны	1	2	1	2	1	2			
Среднее за 1993–2011	–7,0	90	87	568	719	92	131	99	152	Среднее за 1993/94—2010/11	–3254	152
2012	–4,1	101	94	870	1054	98	147	184	233	2011/12	–2332,73	135
2013	–7,3	102	96	656	748	87	110	129	150	2012/13	–3109,86	144,5
2014	–7,7	90	87	393	492	81	117	115	151	2013/14	–3292,45	202,6
2015	–5,2	100	95	764	913	112	141	133	179	2014/15	–3026,83	195,8
2016	–3,7	115	109	1409	1427	151	163	174	196	2015/16	–2437,3	127,3
2017	–4,6	98	93	705	817	94	132	47	77	2016/17	–3120,72	150,6
2018	–6,1	92	83	457	720	83	133	123	194	2017/18	–2778,25	232,3
2019	–5,3	93	88	658	823	74	122	66	150	2018/19	–2609,84	185

Примечание. 1 — до даты измерения глубины протаивания, 2 — за теплый период.

Note. 1 — to date of thawing thickness measurement, 2 — total.

Так как проанализированные климатические данные (см. табл. 1) свидетельствуют о том, что именно летний сезон 2012 г. был наиболее благоприятным для развития термоденудации, не вызывает сомнений, что усиление активности процесса произошло в летний сезон 2012 г. Утверждать, что такое усиление активности термоденудационных процессов, связанных с вытаиванием подземных льдов, произошло именно на фоне аномально теплых климатических условий 2012 г., позволяют и прямые полевые наблюдения на некоторых участках. В 2011 г. термоцирки не наблюдались. В 2012 г. при полевой съемке был обнаружен новый термоцирк, отсутствующий на космическом снимке 2010 г. На космическом снимке GeoEye-1 за 5 июля 2013 г. во многих депрессиях, включая дешифрируемые как свежие термоцирки, наблюдались снежники. Это исключает возможность начала формирования термоцирков в 2013 г. Таким образом, большинство свежих наблюдаемых по космическим снимкам 2013 г. термоцирков наиболее вероятно начало формироваться в теплый период 2012 г. в результате достижения сезонным протаиванием кровли пластового льда или сильнольдистых многолетнемерзлых пород. Исключение составляют термоцирки, наблюдаемые как активные на космическом снимке 2010 г.

К 2018 г., согласно используемым данным дистанционного зондирования, на территории исследования насчитывалось 158 объектов, дешифрируемых как термоцирки, но характеризующихся разной активностью на три временных среза, которые определяются датами дистанционной съемки: 2010, 2013 и 2018 гг. (табл. 2). Все эти термоцирки показаны на карте (рис. 2). Учитывая имеющийся неполный охват дистанционными материалами 2010 и 2018 гг. территории, покрытой космическими снимками 2013 г., активность термоцирков, попавших в эти зоны неполного покрытия, в 2010 или 2018 гг. оценивалась экспертно на основе степени активности по состоянию на даты с доступными данными дистанционного зондирования для участков развития термоцирков. Для 22 объектов отсутствует покрытие в 2010 г., для других 17 — в 2018 г. Соответственно, для первых оценивалась вероятность их наличия в 2010 г. по имеющимся данным 2013 и 2018 гг., а для вторых — наиболее вероятный сценарий их развития в 2018 г. на основе данных 2010 и 2013 гг.

В общем термоцирки подразделяются на активные (стадия активизации) и зарастающие/заросшие (стадия зарастания или стабилизации). К активным отнесены объекты, характеризующиеся наличием активной стенки, в которой, согласно имею-

Таблица 2

Стадии активности термоцирков (ТЦ) в 2010–2018 гг.

Table 2

Stages of thermocirques (TC) activity in 2010–2018

Год	Класс ТЦ по набору стадий активности									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Э*
2010	+	x	z	+	z	x	z	+	z	+
2013	+	+	+	+	z	+	+	z	z	+
2018	+	+	+	z	+	z	z	z	z	+
Количество ТЦ	6	19	15	12	1	24	16	1	33	31

Примечание. Стадии активности: + — активизации; z — зарастания; x — ТЦ отсутствует; *Э — эмбриональные термоцирки.

Note. Activity stages: + — activation; z — overgrowing; x — TC absent; *Э — embryonic thermocirques.

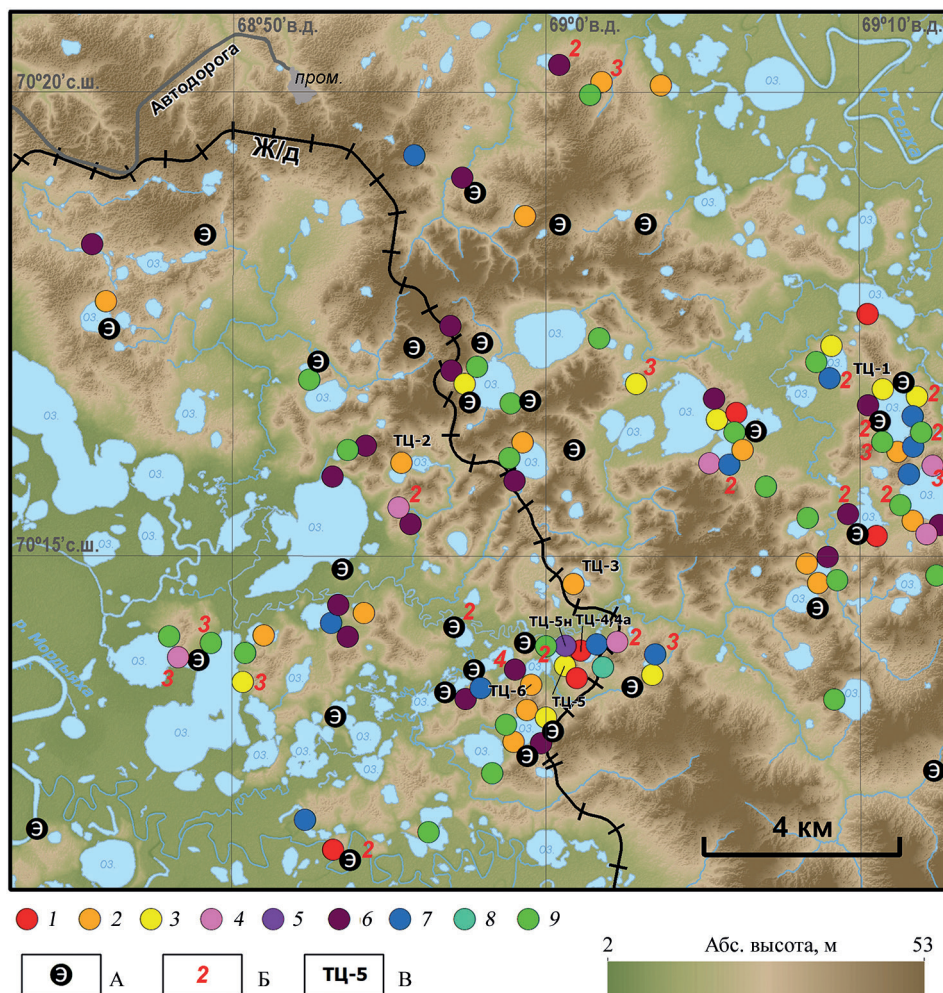


Рис. 2. Карта термоцирков (ТЦ) с разной активностью в 2010, 2013 и 2018 гг.

1–9 — класс ТЦ, согласно табл. 2; А — эмбриональные ТЦ, согласно табл. 2; Б — число рядом расположенных ТЦ одного класса; В — индексы ТЦ, регулярно наблюдаемых с 2012–2013 гг.

Fig. 2. Map of thermocirques (TC) with different activity in 2010, 2013 and 2018.

1–9 — TC class, according to Table 2; А — embryonic TC, according to Table 2; Б — number of adjacent TC of the same class; В — indices of TC under regular monitoring since 2012–2013

щимся космическим снимкам и полевым наблюдениям, хотя бы частично обнажается пластовая залежь или повторно-жильные льды. Поверхность чаши термоцирка по большей части лишена растительного покрова, отчетливо дешифрируются следы выноса материала со стенки (эрозионные промоины, конусы выноса на поверхности и в акватории водного объекта, повышенная мутность водного объекта, в который происходит снос материала из термоцирка). Принципиальных различий между зарастающим и заросшим термоцирком в рамках настоящей статьи нет, однако пояснить эти различия необходимо. К заросшим отнесены термоцирки без активной стенки, пластовая залежь бронирована осадочным материалом со стенки, на поверхности

чаши термоцирка отмечается густой растительный покров. При этом растительный покров заметно отличается от окружающей местности, а стенка дешифрируется как лишенная растительного покрова, могут присутствовать лишь пионерные группировки растительности. Зарастающие термоцирки отличаются начальной стадией формирования растительного покрова, для них характерны участки, лишенные какой-либо растительности. Отдельно выделяются эмбриональные термоцирки [14], фактически представляющие собой криогенные оползни течения, в результате которых незначительно обнажились льдистые мерзлые породы или подземные льды и есть предпосылки для дальнейшего вытаивания мерзлых пород или льда.

Изменение количества термоцирков с разной активностью показано на рис. 3. На протяжении всего времени наблюдалось 33 заросших/зарастающих термоцирка. Аномальные климатические условия 2016 г. не привели к массовому увеличению темпов термоденудации по пластовым льдам. Фактически к 2018 г. активизировался только 1 из заросших/зарастающих термоцирков, а общее количество активных сократилось по сравнению с 2013 г. более чем вдвое. Возникновение новых термоцирков в период после 5 июля 2013 г. и затухание процесса их развития к 2018 г. исключается, так как, по дистанционным данным, в 2018 г. в сравнении с 2013 г. абсолютно новых активных или зарастающих объектов не обнаружено.

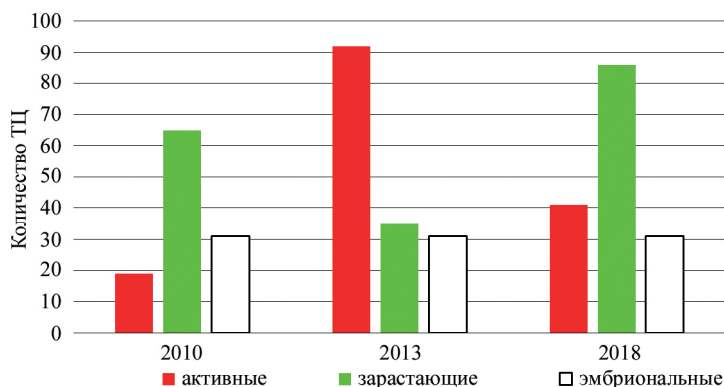


Рис. 3. Количество термоцирков (ТЦ) с разной активностью в 2010, 2013 и 2018 гг.

Fig. 3. Number of thermocirques (TC) with different activity in 2010, 2013 and 2018

Соответственно, за период с 2010 по 2018 г. активность термоденудации повысилась за счет аномальных климатических условий 2012 г., а затем пошла на спад. Примерно 40 % из активизировавшихся термоцирков по состоянию на 2013 г. образовались на месте заросших. Образовалось 43 абсолютно новых на ранее стабильных склонах.

Территориально подавляющая часть всех термоцирков, отмеченных с 2010 по 2018 г., расположена по берегам озер и озерных котловин (102 ТЦ), только 1 термоцирк отмечен на берегу крупной реки, 10 ТЦ — по берегам мелких термокарстовых озерков и 8 ТЦ — не имеют строгой приуроченности к берегам водных объектов. Почти все возникшие в 2013 г. новые термоцирки образовались на ранее стабильных участках берегов озер (70 %) и мелких озерков (25 %). Практически все термоцирки развиваются в естественных условиях, только 5 из них образовались под влиянием техногенной деятельности в коридоре железной дороги после механического нарушения растительного покрова и пород сезонно-талого слоя. Часть таких объектов активизировались непо-

средственно после возведения железной дороги в 2010 г., а часть позднее — к 2013 г. Все «техногенные» термоцирки были рекультивированы во избежание влияния на железную дорогу и фактически перестали существовать. Также на развитие незначительного числа других термоцирков, как, например, ТЦ-4,4а (см. рис. 1в и рис. 2), могли косвенно повлиять многочисленные колеи проезда тяжелой техники, особенно вблизи коридора железной дороги. Однако существенного влияния техногенных факторов на активизацию большинства термоцирков не выявлено.

Весь анализируемый период наблюдался 31 эмбриональный термоцирк (см. табл. 2, рис. 2 и 3). К таким были отнесены небольшие медленно прогрессирующие и незарастающие характерные нарушения высоких берегов озер (42 %) и рек (13 %), а также берегов мелких термокарстовых озерков (45 %). Пример одного из таких термоцирков показан на рис. 4. Согласно полевым наблюдениям, некоторые из таких эмбриональных термоцирков развиваются, что, однако, практически незаметно при сопоставлении имеющихся дистанционных материалов.

Довольно широко распространенные протяженные участки высоких берегов озер и рек, явно развивающиеся под действием термоабразии (рис. 5) или русловых процессов (согласно дешифровочным признакам), не учитывались.

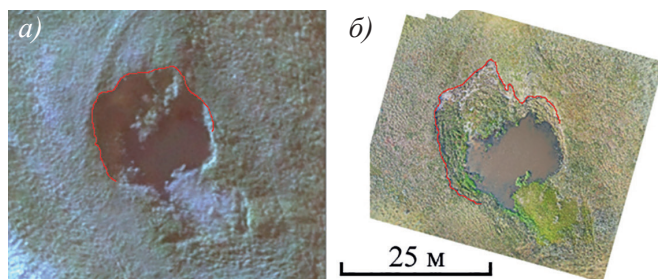


Рис. 4. Пример эмбрионального термоцирка на космическом снимке WorldView-2 за 10 июля 2018 г. (а) и на ортофотоплане на основе БПЛА-съемки за 21 августа 2020 г. (б).

Красной линией показана бровка термоцирка

Fig. 4. Example of an embryonic thermocirque on a WorldView-2 image, date 10.07.2018 (a) and on an orthophotoplan, based on UAV-survey, date 21.08.2020 (b).

The red line is the thermocirque edge

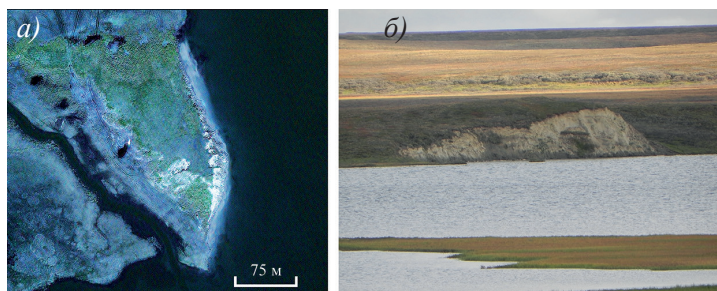


Рис. 5. Примеры термоабразионных уступов на космическом снимке GeoEye-1 за 5 июля 2013 г. (Digital Globe Foundation©) (а) и при полевых наблюдениях (фото А.В. Хомутова, август 2015 г.) (б)

Fig. 5. Examples of thermoabrasion cliffs on GeoEye-1 image, date 05.07.2013 (Digital Globe Foundation©) (a) and by field survey (photo by A.V. Khomutov, August 2015) (b)

Обсуждение результатов

На современном этапе для разных районов Арктики с подземными льдами, не только для исследуемой территории, характерно увеличение активности процесса термоденудации [24–26].

Формирование большого числа термоцирков в районе исследований именно в 2012 г. не носит случайного характера. Теплый сезон 2012 г. характеризовался ранней весной, индекс оттаивания до даты измерения протаивания более чем в 1,5 раза превысил среднее значение предыдущего почти 20-летнего периода, а летних осадков выпало почти в 2 раза больше. В дальнейшие темпы роста возникших термоденудационных форм рельефа внесли свой вклад достаточно благоприятные климатические условия теплого сезона 2013 г., а различия в этих темпах для разных термоцирков связаны с условиями поверхности, в которых сформировались эти формы рельефа [13]. Повышенное снегонакопление в свежих на тот момент отрицательных формах рельефа, обусловленное в районе исследования ветровым перераспределением [27], способствовало быстрому росту термоцирков под действием термоэрозии, развивающейся в результате таяния снега, накопившегося на стенках термоцирков [28]. Как предполагают некоторые исследователи, увеличение глубины протаивания и температуры пород из-за повышенного снегонакопления [29, 30] может спровоцировать в дальнейшем повторную активизацию процесса после его затухания. В то же время снег сносит поверхностные отложения с днища термоцирка за счет нивации и эрозионных потоков, тем самым одновременно и углубляя термоцирк, и способствуя его затуханию за счет бронирования выноса аккумуляцией отложений. Однако для более точного определения влияния снегонакопления необходимы детальные и длительные натурные наблюдения в период снеготаяния.

Если сравнивать полученные результаты анализа проявления термоденудации на локальном уровне с результатами регионального исследования [31], снимки сверхвысокого пространственного разрешения позволяют выявить почти в 7 раз больше термоденудационных форм рельефа на одной и той же территории, что согласуется с выводом в [32] о наибольшей точности получения результатов параметрического изучения термоденудационных форм рельефа при полевых измерениях или использовании снимков сверхвысокого разрешения. По космическим снимкам сверхвысокого (субметрового) пространственного разрешения в районе исследования было выявлено 158 термоденудационных форм с разной активностью, а при использовании мозаики снимков сервиса Яндекс.Карты [31] с разрешением не выше 15 м — только 23, из которых большая часть (74 %) активные. Соответственно, при проведении подобных региональных [31, 33] и даже циркумполярных исследований [34] необходимо принимать во внимание потерю из анализа значительного числа термоденудационных форм как по причине невозможности их выделения при мелкомасштабном дешифрировании, так и вследствие несовершенства современных открытых мозаик космических снимков, в которых часто используются различающиеся по дате съемки сцены.

Наличие достаточно большого числа эмбриональных термоцирков среди термоденудационных форм рельефа, выявленных по космическим снимкам, говорит о том, что процессы термоденудации развиваются постоянно. Однако, по мнению авторов, отмеченные эмбриональные термоцирки зачастую не развиваются в «классические» по двум основным причинам: 1) возникают на склоне с незначительным уклоном, из-за чего залежь льда сразу бронируется снесенным материалом; 2) возникают за счет вскрытия сезонным протаиванием многолетнемерзлых пород более льдистых,

чем вышележащие. При этом льдистость этих пород недостаточна для развития «классического» термоцирка. В этом случае происходит формирование криогенного оползня течения, но дальнейшего развития процесс термоденудации не получает.

Заключение

За период с 2010 по 2018 г. активность термоденудации в изучаемом районе повысилась за счет аномальных климатических условий весенне-летнего сезона 2012 г., а затем постепенно пошла на спад. Условия достаточно жаркого лета 2013 г. способствовали высоким темпам вытаивания подземного льда во вновь активизировавшихся и новых термоцирках.

Условия аномально жаркого лета 2016 г. не внесли существенного вклада в активность термоденудационных процессов. Для следующего существенного витка активизации термоденудации в районе исследований необходимо более глубокое протаивание, чем в 2012, 2013 и 2016 гг.

Проведенный для территории ключевого участка «Васькины Дачи» анализ активности термоцирков по использованным данным дистанционного зондирования Земли из космоса показал, что помимо «классических» термоцирков, находящихся в эти три временных среза (2010, 2013, 2018) на разных стадиях активности, выделено существенное количество эмбриональных термоцирков, которые, как и большинство небольших «классических» термоцирков, могут быть выявлены только по космическим снимкам со сверхвысоким пространственным разрешением.

Конфликт интересов. Авторы статьи не имеют конфликта интересов.

Финансирование. Работа выполнена Институтом криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRZ-2021-0012). Данные мониторинга глубины сезонного протаивания (с 1993 по 2018 г.) и термоцирков (с 2012 по 2017 г.) получены в рамках интеграционных проектов СО РАН № 122 и 144. Мониторинг термоцирков в 2018–2020 гг., а также первоначальный этап анализа их активности проведены в рамках гранта РФФИ № 18-05-60222. Экспедиции организованы при поддержке НП «МЭЦ “Арктика”» (2014–2017 гг.) и НП «Российский центр освоения Арктики» (2018–2019 гг.).

Благодарности. Авторы признательны сотрудникам ИКЗ ТюмНЦ СО РАН Е.М. Бабкину и Д.Р. Мулланурову, а также сотрудникам МГУ им. М.В. Ломоносова канд. геогр. наук А.И. Кизякову и Д.Ю. Некрасову за помощь в проведении полевых исследований; компании Digital Globe Foundation за предоставленные данные дистанционного зондирования 2010 и 2013 гг. Отдельная благодарность д-ру геол.-минерал. наук М.О. Лейбман за ценные советы и важные замечания при проведении исследования и подготовке настоящей статьи.

Competing interests. Authors declare no conflict of interests.

Funding. The research was carried by the Earth Cryosphere Institute of the Tyumen Scientific Centre of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme No. FWRZ-2021-0012). Datasets of seasonal thaw thickness (1993–2018) and thermocirques (2012–2017) monitoring received within the framework of the integration projects of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences No. 122 and 144. Thermocirques monitoring in 2018–2020 and first stage of their activity analysis was carried within the framework of the RFBR grant No. 18-05-60222. The expeditions were organized by the Interregional Expedition Centre «Arctic» (2014–2017) and The Russian Center of Arctic Exploration (2018–2019).

Acknowledgments. The authors are thankful to the researchers of the Earth Cryosphere Institute Tyumen Scientific Centre SB RAS E.M. Babkin and D.R. Mullanurov, as well as employees of Lomonosov Moscow State University Ph. D. A.I. Kizyakov and D.Yu. Nekrasov for assistance in field research; to the Digital Globe Foundation for providing 2010 and 2013 remote sensing data. Special thanks to the Doctor of Geology and Mineralogy M.O. Leibman for valuable advice and important comments during the research and preparation of this paper.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Кизяков А.И., Лейбман М.О., Передня Д.Д. Деструктивные рельефообразующие процессы побережий Арктических равнин с пластовыми подземными льдами. *Криосфера Земли*. 2006;10(2):79–89.
Kizyakov A.I., Leibman M.O., Perednya D.D. Destructive relief-forming processes on the Arctic Plains with tabular ground ice. *Kriosfera Zemli = Earth's Cryosphere*. 2006;10(2):79–89. (In Russ.)
2. Кизяков А.И., Лейбман М.О. Рельефообразующие криогенные процессы: обзор литературы за 2010–2015 годы. *Криосфера Земли*. 2016;20(4):45–58.
Kizyakov A.I., Leibman M.O. Cryogenic relief-formation processes: a review of 2010–2015 publications. *Kriosfera Zemli = Earth's Cryosphere*. 2016;20(4):45–58.
3. Белова Н.Г. Пластовые льды юго-западного побережья Карского моря. М.: МАКС Пресс; 2014. 180 с.
4. Гусев Е.А. Наблюдения за геоморфологическими процессами на севере Западной Сибири (на примере района Сопочной Карги). *Успехи современного естествознания*. 2011;9:19–22.
Gusev E.A. Geomorphologic processes observations on the north of West Siberia (Sopochnaya Karga area). *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniia = Advances in current natural sciences*. 2011;9:19–22. (In Russ.)
5. Куницкий В.В., Сыромятников И.И., Ширрмейстер Л., Скачков Ю.Б., Гроссе Г., Веттерих С., Григорьев М.Н. Льдистые породы и термоденудация в районе поселка Батагай (Янское плоскогорье, Восточная Сибирь). *Криосфера Земли*. 2013;17(1):56–68.
Kunitsky V.V., Syromyatnikov I.I., Schirrmeister L., Skachkov Yu.B., Grosse G., Wetterich S., Grigoriev M.N. Ice-rich permafrost and thermal denudation in the Batagay area (Yana Upland, East Siberia). *Kriosfera Zemli = Earth's Cryosphere*. 2013;17(1): 56–68. (In Russ.)
6. Пижанкова Е.И. Термоденудация в береговой зоне Ляховских островов (результаты дешифрирования аэрокосмических снимков). *Криосфера Земли*. 2011;15(3):61–70.
Pizhankova E.I. Termodenudation in the coastal zone of the Lyakhovsky islands (interpretation of aerospace images). *Kriosfera Zemli = Earth's Cryosphere*. 2011;15(3):61–70. (In Russ.)
7. Günther F., Overduin P.P., Yakshina I.A., Opel T., Baranskaya A.V., Grigoriev M.N. Observing Muostakh disappear: permafrost thaw subsidence and erosion of a ground-ice-rich island in response to arctic summer warming and sea ice reduction. *The Cryosphere*. 2015;9(1):151–178. <https://doi.org/10.5194/tc-9-151-2015>
8. Lantuit H., Pollard W.H., Couture N., Fritz M., Schirrmeister L., Meyer H., Hubberten H.-W. Modern and late Holocene retrogressive thaw slump activity on the Yukon coastal plain and Herschel Island, Yukon Territory, Canada. *Permafrost and Periglacial Processes*. 2012;23(1):39–51. <https://doi.org/10.1002/ppp.1731>
9. Segal R.A., Lantz T.C., Kokelj S.V. Acceleration of thaw slump activity in glaciated landscapes of the Western Canadian Arctic. *Environmental Research Letters*. 2016;11(3):034025. <https://doi.org/10.1088/1748%2D9326/11/3/034025>
10. Swanson D.K., Nolan M. Growth of retrogressive thaw slumps in the Noatak Valley, Alaska, 2010–2016, measured by airborne photogrammetry. *Remote sensing*. 2018;10(7):983. <https://doi.org/10.3390/rs10070983>
11. Губарьков А.А., Лейбман М.О. Чёткообразные русловые формы в долинах малых рек на Центральном Ямале — результат парагенеза криогенных и гидрологических процессов. *Криосфера Земли*. 2010;14(1):41–49.
Gubar'kov A.A., Leibman M.O. Bead-shaped channel forms as evidence of paragenesis of cryogenic and hydrological processes in the small-river valleys of Central Yamal. *Kriosfera Zemli = Earth's Cryosphere*. 2010;14(1):41–49. (In Russ.)

12. Кизяков А.И., Зимин М.В., Лейбман М.О., Правикова Н.В. Мониторинг скорости термоденудации и термоабразии на западном побережье острова Колгуев с использованием материалов космической съемки высокого разрешения. *Криосфера Земли*. 2013;17(4):36–47. Kizyakov A.I., Zimin M.V., Leibman M.O., Pravikova N.V. Monitoring of the rate of thermal denudation and thermal abrasion on the western coast of Kolguev Island, using high resolution satellite images. *Kriosfera Zemli = Earth's Cryosphere*. 2013;17(4):36–47. (In Russ.)
13. Khomutov A., Leibman M., Dvornikov Yu., Gubarkov A., Mullanurov D., Khairullin R. Activation of cryogenic earth flows and formation of thermocirques in Central Yamal as a result of climate fluctuations. In: Mikoš K., Vilimek V., Yin Y., Sassa K. (eds). *Advancing culture of living with landslides*. WLF 2017. Cham: Springer International Publishing AG; 2017. P. 209–216. https://doi.org/10.1007/978-3-319-53483-1_24
14. Лейбман М.О., Кизяков А.И. *Криогенные оползни Ямала и Югорского полуострова*. М.: Институт криосферы земли СО РАН; 2007. 206 с.
15. Dupeyrat L., Costard F., Randriamazaoro R., Gailhardis E., Gautier E., Fedorov A. Effects of ice content on the thermal erosion of permafrost: implications for coastal and fluvial erosion. *Permafrost and Periglacial Processes*. 2011;22(2):179–187. <https://doi.org/10.1002/ppp.722>
16. Ulrich M., Grosse G., Strauss J., Schirmermeister L. Quantifying wedge-ice volumes in yedoma and thermokarst basin deposits. *Permafrost and Periglacial Processes*. 2014;25(3):151–161. <https://doi.org/10.1002/ppp.1810>
17. Бабкина Е.А., Лейбман М.О., Дворников Ю.А., Факашук Н.Ю., Хайруллин Р.Р., Хомутов А.В. Активизация криогенных процессов на территории Центрального Ямала как следствие региональных и локальных изменений климата и теплового состояния пород. *Метеорология и гидрология*. 2019;4:99–109.
Babkina E.A., Leibman M.O., Dvornikov Yu.A., Fakashuk N.Yu., Khairullin R.R., Khomutov A.V. Activation of cryogenic processes in Central Yamal as a result of Regional and Local change in climate and thermal state of permafrost. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2019;44(4):283–290. <https://doi.org/10.3103/S1068373919040083>
18. Хомутов А.В., Лейбман М.О. Ландшафтные факторы изменения скорости термоденудации на побережье Югорского полуострова. *Криосфера Земли*. 2008;12(4):24–35.
Khomutov A.V., Leibman M.O. Landscape controls of thermodenudation rate change on Yugorsky Peninsula coast. *Kriosfera Zemli = Earth's Cryosphere*. 2008;12(4):24–35. (In Russ.)
19. Lantz T.C., Kokelj S.V. Increasing rates of retrogressive thaw slump activity in the Mackenzie Delta region, N.W.T., Canada. *Geophysical Research Letters*. 2008;35(6):L06502. <https://doi.org/10.1029/2007GL032433>
20. Лейбман М.О., Хомутов А.В. Стационар «Васькины Дачи» на Центральном Ямале: 30 лет исследований. *Криосфера Земли*. 2019;23(1):91–95. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2019-1\(91-95\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2019-1(91-95))
Leibman M.O., Khomutov A.V. Research station “Vaskiny Dachi” at Central Yamal: 30 years of study. *Earth's Cryosphere*. 2019;23(1):78–82. [https://doi.org/10.21782/EC2541-9994-2019-1\(78-82\)](https://doi.org/10.21782/EC2541-9994-2019-1(78-82))
21. Leibman M.O. Preliminary results of cryogenic landslides study on Yamal Peninsula, Russia. *Permafrost and Periglacial Processes*. 1995;6(3):259–264. <https://doi.org/10.1002/ppp.3430060307>
22. Leibman M.O., Khomutov A.V., Kizyakov A.I. Cryogenic landslides in the West-Siberian plain of Russia: classification, mechanisms and landforms. In: Shan W. et al. (eds.). *Landslides in Cold Regions in the Context of Climate Change, Environmental Science and Engineering*. Springer International Publishing AG; 2014. P. 143–162. https://doi.org/10.1007/978-3-319-00867-7_11.
23. *Специализированные массивы для климатических исследований*. 2000–2011–2018–2022. URL: <http://aisori-m.meteo.ru> (дата обращения 24.11.2022)

24. Маслаков А.А., Кузякин Л.П., Комова Н.Н. Динамика развития термоцирка, вмещающего залежь пластового льда, вблизи села Лаврентия (Чукотский АО) за 2018–2021 гг. *Арктика и Антарктика*. 2021;(4):32–46. <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2021.4.37225>
Maslakov A.A., Kusiakin L.P., Komova N.N. Dynamics of thermocirque, enclosing tabular ground ice, near the settlement Lavrentiy (Chukotsky Autonomus Okrug) in 2018–2021. *Arktika i Antarktika = Arctic and Antarctic*. 2021;(4):32–46. (In Russ.). <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2021.4.37225>
25. Leibman M., Kizyakov A., Zhdanova Y., Sonyushkin A., Zimin M. Coastal retreat due to thermodenudation on the Yugorsky Peninsula, Russia during the last decade, update since 2001–2010. *Remote Sensing*. 2021;13(20):4042. <https://doi.org/10.3390/rs13204042>
26. Lewkowicz A.G., Way R.G. Extremes of summer climate trigger thousands of thermokarst landslides in a high Arctic environment. *Nature Communications*. 2019;10(1):1329. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09314-7>
27. Дворников Ю.А., Хомутов А.В., Муллануров Д.Р., Ермохина К.А. Моделирование распределения водного эквивалента снежного покрова в тундре с использованием ГИС и данных полевой снегомерной съемки. *Лед и снег*. 2015;55(2):69–80. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2015-2-69-80>
Dvornikov Y.A., Khomutov A.V., Mullanurov D.R., Ermokhina K.A. GIS- and field data based modeling of snow water equivalent in shrub tundra. *Led i sneg = Ice and Snow*. 2015;55(2):69–80. (In Russ.). <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2015-2-69-80>
28. Губарьков А.А., Лейбман М.О., Мельников В.П., Хомутов А.В. Вклад термоэрозии и термоденудации в отступление берегов Югорского полуострова. *Доклады Академии наук*. 2008;423(4):543–545.
Gubar'kov A.A., Leibman M.O., Mel'nikov V.P., Khomutov A.V. Contribution of lateral thermoerosion and thermal denudation to coastal retreat of the Yugorskii Peninsula. *Doklady Earth Sciences*. 2008;423(2):1452–1454. <https://doi.org/10.1134/S1028334X08090286>
29. Lantz T.C., Kokelj S.V., Gergel S.E., Henry R. Relative impacts of disturbance and temperature: persistent changes in microenvironment and vegetation in retrogressive thaw slumps. *Global Change Biology*. 2009;15(7):1664–1675. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.01917.x>
30. Kokelj S.V., Lantz T.C., Kanigan J., Smith S.L., Coutts R. Origin and polycyclic behaviour of Tundra thaw slumps, Mackenzie delta region, Northwest Territories, Canada. *Permafrost and periglacial processes*. 2009;20(2):173–184. <https://doi.org/10.1002/ppp.642>
31. Нестерова Н.Б., Хомутов А.В., Лейбман М.О., Сафонов Т.А., Белова Н.Г. Инвентаризация термоцирков на Севере Западной Сибири по данным мозаики спутниковых снимков 2016–2018 годов. *Криосфера Земли*. 2021;25(6):41–50. <https://doi.org/10.15372/KZ20210604>
Nesterova N.B., Khomutov A.V., Leibman M.O., Safonov T.A., Belova N.G. The inventory of retrogressive thaw slumps (thermocirques) in the north of West Siberia based on 2016–2018 satellite imagery mosaic. *Earth's Cryosphere*. 2021;25(6):34–41. <https://doi.org/10.15372/KZ20210604>
32. Лейбман М.О., Кизяков А.И., Нестерова Н.Б., Тарасевич И.И. Классификация криогенно-оползневых форм рельефа для целей картографирования и прогноза. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2023;69(4):486–500. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-4-486-500>
Leibman M.O., Kizyakov A.I., Nesterova N.B., Tarasevich I.I. Classification of cryogenic-landslide landforms for mapping and prediction. *Arctic and Antarctic Research*. 2023;69(4):486–500. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-4-486-500>
33. Leibman M., Nesterova N., Altukhov M. Distribution and morphometry of thermocirques in the North of West Siberia, Russia. *Geosciences*. 2023;13(6):167. <https://doi.org/10.3390/geosciences13060167>
34. Huang L., Willis M.J., Guiye L., Lantz T.C., Schaefer K., Wig E., Cao G., Tiampo K.F. Identifying active retrogressive thaw slumps from ArcticDEM. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2023;205:301–316. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2023.10.008>

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-2-238-252>

УДК 551.467



Критерии айсберговой опасности в морях Арктической зоны Российской Федерации

И.А. Бычкова✉, К.Г. Кортикова, В.Г. Смирнов

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,
Санкт-Петербург, Россия

✉bychkova@aari.ru

ИАБ, 0009-0005-9736-1930

Аннотация. Задачей исследования была разработка количественных критериев айсберговой опасности для морей Российской Арктики, основанных на результатах статистической обработки материалов регулярной спутниковой съемки. В качестве источника информации использовалась некоммерческая информация видимого диапазона с ИСЗ Landsat-8 (пространственное разрешение 15 м) за 2014–2023 гг. Критерии айсберговой опасности предложено выражать в баллах. Основным критерием является величина среднесуточной плотности айсбергов в квадратах регулярной сетки, полученная для того или иного месяца (сезона) года и выражаемая по 5-балльной шкале. В качестве дополнительных критериев использованы: фиксация наблюдения в квадрате сетки айсбергов длиной более 200 м (обширные айсберги, по классификации Всемирной метеорологической организации, ВМО), айсбергов с высотой надводной части более 25 м, айсбергов, сидящих на грунте (айсберговые ловушки), и айсбергов с высокими скоростями дрейфа (>1 км/ч). Дополнительные критерии оценены в 1 балл шкалы айсберговой опасности. Для обнаружения айсбергов на снимках использована методика, основанная на статистических критериях поиска градиентных зон при анализе двумерных полей спутниковых изображений. Для автоматизированного поиска айсбергов, сидящих на мели среди дрейфующих льдов, применена сверточная нейронная сеть, построенная по архитектуре U-Net. Даны примеры применения разработанных критериев для района Северной Земли. Показана возможность районирования акватории по степени айсберговой опасности с использованием предложенных критериев.

Ключевые слова: айсберговая опасность, арктические моря, видимый диапазон, сверточная нейронная сеть, спутниковый мониторинг

Для цитирования: Бычкова И.А., Кортикова К.Г., Смирнов В.Г. Критерии айсберговой опасности в морях Арктической зоны Российской Федерации. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2024;70(2):238–252. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-2-238-252>

Поступила 05.04.2024

После переработки 13.05.2024

Принята 17.05.2024

Criteria of iceberg hazard in the seas of the Russian Federation Arctic zone

Irina A. Bychkova✉, Karina G. Kortikova, Vladimir G. Smirnov

State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute,
St. Petersburg, Russia

✉bychkova@aari.ru

 IAB, 0009-0005-9736-1930

Abstract. The aim of the study was to develop quantitative criteria of iceberg hazard for the seas of the Russian Arctic based on the results of statistical processing of the data of regular satellite surveys. The study used non-commercial data of the visible spectral range from the Landsat-8 satellite (spatial resolution of 15 m) for 2014–2023. It is proposed that the criteria of iceberg danger be expressed in points. The main criterion is the value of the average daily density of icebergs in squares of a regular grid obtained for a particular month (season) of the year and expressed on a 5-point scale. Additional criteria included registration in the iceberg grid with a length of more than 200 m (extensive icebergs according to the classification of the World Meteorological Organization, WMO), icebergs with a surface height of more than 25 m, grounded icebergs (iceberg traps), and icebergs with high drift speeds (>1 km/hour). The additional criteria are estimated at 1 point on the iceberg hazard scale. To detect icebergs in the images, a technique was used based on statistical criteria for searching for gradient zones in the analysis of two-dimensional fields of satellite images. A convolutional neural network based on the U-Net architecture was used to automate the detection of grounded icebergs among drifting ice floes. Examples are given of the application of the criteria developed to the Severnaya Zemlya region. The possibility is discussed of zoning the water area according to the degree of iceberg hazard using the criteria suggested.

Keywords: Arctic seas, convolutional neural network, degree of iceberg hazard, satellite monitoring, visible spectral range

For citation: Bychkova I.A., Kortikova K.G., Smirnov V.G. Criteria of iceberg hazard in the seas of the Russian Federation Arctic zone. *Arctic and Antarctic Research*. 2024;70(2):238–252. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-2-238–252>

Received 05.04.2024

Revised 13.05.2024

Accepted 17.05.2024

Введение

Как показал опыт анализа айсберговой угрозы в районах Карского моря и моря Лаптевых, для айсберговой опасности характерна высокая межгодовая изменчивость, во многом связанная с изменчивостью климатических факторов, преобладанием тех или иных атмосферных процессов в конкретный год наблюдения. Поэтому для оценки потенциальной айсберговой опасности в регионе интереса необходимо использовать усредненные статистические характеристики, полученные за статистически значимый период наблюдения. В качестве таких характеристик могут быть выбраны количество айсбергов в квадрате регулярной сетки за определенный промежуток времени, максимальный размер обнаруженного айсберга (длина), скорость перемещения, высота надводной части айсберга и др. Необходимо подчеркнуть, что для оценки статистических характеристик опасных ледяных образований важно использовать достоверные источники информации и выполнять регулярный мониторинг объектов. На настоящее время опубликован ряд работ, авторы которых предложили свои критерии айсберговой опасности в Арктике, основанные на имеющихся базах данных об айсбергах, включающих данные наблюдения различных источников, в том числе судовые и авианаблюдения. Однако данные таких наблюдений получены не в ходе

регулярных мониторинговых работ, а собраны случайным образом, в частности во время проведения экспедиций, выполнявшихся эпизодически в отдельных районах Арктики. Так, в работе [1] основным показателем годовой айсберговой активности в районе Штокмановского газоконденсатного месторождения (ШГКМ), расположенного в Баренцевом море, предложено считать количество эпизодов в году айсберговой активности в окрестностях ШГКМ. Под эпизодом (Э) понимается случай зафиксированного нахождения айсберга (или группы айсбергов) в какую-либо дату в квадрате регулярной сетки размером 2° по широте и 2° по долготе. Анализ материалов базы данных из разных источников (судовые наблюдения, авиаразведка), собранной за период 1950–1990 гг., позволил авторам [1] прийти к критериям айсберговой активности, определяемым по наблюдениям в течение одного календарного года:

- малая айсберговая активность, $\mathcal{E} \leq 5$;
- нормальная айсберговая активность, $5 < \mathcal{E} \leq 18$;
- высокая айсберговая активность, $18 < \mathcal{E} \leq 24$;
- аномальная айсберговая активность, $\mathcal{E} > 24$.

Для ранжирования календарных годов с точки зрения айсберговой активности авторы работы [1] предложили в качестве еще одного критерия использовать среднее за год число фиксаций айсбергов (А) на один эпизод наблюдений (Д): $D = A/\mathcal{E}$.

Д.А. Онищенко, рассматривая айсберговую опасность для добывающей платформы ШГКМ в Баренцевом море, предложил использовать в качестве характеристик айсберговой опасности следующие вероятностные оценки:

- вероятность столкновения платформы с айсбергом в течение одного года;
- вероятность столкновения в течение года с айсбергом, имеющим размеры или массу не меньше заданного значения;
- вероятность столкновения в течение года с айсбергом, имеющим кинетическую энергию не ниже заданной;
- вероятность для айсберга, подошедшего к платформе на расстояние L , столкнуться с платформой;
- вероятность столкновения с айсбергом в течение года, при котором глобальная нагрузка на платформу будет не ниже заданной [2, 3].

Для получения вероятностных оценок столкновения платформы ШГКМ с айсбергом Онищенко использовал историческую базу наблюдений айсбергов за 1881–1991 гг., подготовленную в ААНИИ [4]. Для ранжирования различных регионов Арктики по уровню айсберговой опасности Д.А. Онищенко предложил использовать пространственную плотность айсбергов (среднее число айсбергов в пределах данной области в конкретный момент времени, отнесенное к площади) [2].

Существует также подход к оценке айсберговой опасности через айсберго-продуктивность ледников [5]. Подход основан на моделировании дрейфа айсбергов. По известному стоку массы льда конкретного ледника рассчитывается время формирования айсберга определенной длины, задаваемой случайным образом по распределению Вейбулла. Время между отёлами рассчитывается как отношение объема сгенерированного айсберга к продуктивности ледника. Масса айсберга определяется по ранее установленным регрессионным уравнениям [6]. Далее выполняется расчет дрейфа айсберга по модели, получаемые ежечасные координаты айсберга сортируются по ячейкам сеточной области с шагом 12,5 км, оценивается время нахождения айсбергов в каждой ячейке. Айсберговая опасность (вероятность

встречи с айсбергом) при таком подходе определяется как отношение суммарного времени нахождения айсбергов в каждой ячейке сеточной области модели к общему времени реализации модели [5]. Разработчики этого метода считают полученные ими значения айсберговой опасности заниженными и объясняют это тем, что не для всех ледников имеются в настоящее время оценки айсберговой продуктивности [5].

Предложен еще один метод оценки айсберговой опасности — через расчет по модели условной вероятности [7]. В этой модели принято допущение о том, что в точке генерации всегда присутствует айсберг, то есть условная вероятность встречи айсберга у ледника всегда равна единице, а процесс выноса айсберга из начальной ячейки не прерывается, на место ушедшего айсберга сразу приходит новый. По мере удаления от начальной точки вероятность встречи айсберга снижается в соответствии с гидрометеорологическими условиями. Далее условная вероятность встречи айсберга умножается на вероятность появления айсберга в точке генерации, поля полных вероятностей суммируются [5]. Для практической реализации метода необходимы достоверные оценки вероятности появления айсберга в районе конкретного ледника в заданное время, что само по себе представляет сложную задачу.

В работе британских ученых [8] под айсберговой опасностью понимается вероятность столкновения судна с айсбергом. Для оценки этой вероятности необходимы сведения из достоверных источников информации (в частности, данных дистанционного зондирования) о плотности айсбергов в районе наблюдений. В основе предложенной методики лежит модель дрейфа айсберга, в которой используется океаническая модель PS4, учитывается таяние айсберга при дрейфе. Расчеты выполнены авторами [8] для пяти конкретных точек на судоходных трассах в районе Фолклендских островов. Влияние морского льда на дрейф айсбергов не рассматривается.

Анализ существующих подходов к оценке айсберговой опасности показывает необходимость формирования репрезентативной базы архивных наблюдений айсбергов, выполненных на регулярной основе по квадратам картографической сетки. Оптимальным способом получения таких результатов может быть использование дистанционных средств наблюдения, преимущественно спутниковых. Определенным ограничением при этом является необходимость применять для анализа только сопоставимые источники спутниковых данных. Исключаются, например, ситуации одновременного использования в базе данных снимков разного пространственного разрешения, так как это приводит к существенной разнице как в количестве айсбергов, обнаруженных разными спутниковыми средствами наблюдения в квадратах сетки, так и в значениях геометрических параметров [9]. Как показал опыт обработки доступных некоммерческих квазисинхронных спутниковых изображений одного и того же района, полученных с оптических средств наблюдения (видимый диапазон, разрешение 15 м) и с радиолокатора (размер пикселя 40 м), данные видимого диапазона позволяют более надежно оценить реальные параметры айсбергов и уменьшить число ложных фиксаций айсбергов. Радиолокационные средства наблюдения все же позволяют при этом получить качественную оценку распределения плотности айсбергов на уровне индикаторов — высокая плотность, низкая плотность [9]. Разумеется, радиолокационная съемка высокого пространственного разрешения (метры) позволяет получить более достоверную оценку параметров обнаруженных айсбергов, однако сформировать репрезентативную базу таких снимков за ряд лет по какому-либо протяженному арктическому региону в настоящее время невозможно,

поскольку такая съемка выполняется только по предварительному заказу и многие районы Арктики такой съемкой не покрываются. Тем более следует учесть, что собственный РЛ-спутник в РФ появился только в 2023 г.

Таким образом, для формирования спутниковой базы данных об айсбергах наиболее предпочтительным источником информации в настоящее время являются снимки видимого диапазона с некоммерческих спутников с достаточным пространственным разрешением (10–15 м) и желательно более длительным периодом функционирования спутника с момента его запуска. Этим условиям лучше всего удовлетворяет спутниковая система Landsat-8 (9), данные с которой доступны за период с лета 2013 г. по настоящее время. То есть при использовании данных спутников Landsat-8 (9) может быть сформирована база наблюдений айсбергов за 10 лет (2014–2023 гг.) и по этим данным могут быть получены статистические оценки айсберговой опасности.

Методика исследований и материалы наблюдений

Для оценки айсберговой угрозы в морях Российской Арктики использовались спутниковые снимки, полученные со спутника Landsat-8 за 2014–2023 гг.

Статистические характеристики айсбергов были рассчитаны для квадратов географической сетки со стороной 25 км, охватывающей районы айсберговой опасности в акватории Северного морского пути (СМП). Для каждого квадрата сетки на заданный месяц наблюдения подсчитывается общее число обнаруженных айсбергов (N) и число информативных съемочных дней (d). Выполняется расчет плотности айсбергов $k = N/d$, и для каждого квадрата вычисляется среднее значение длины и ширины айсбергов и максимальное значение длины обнаруженного айсберга.

Число информативных съемочных дней для снимков видимого диапазона определяется как разность количества съемок в месяц, при которых квадрат попал в поле зрения (P), и количества съемок, во время которых квадрат был закрыт облачностью (O): $d = P - O$.

Для квадратов сетки в прибрежных зонах архипелагов, содержащих одновременно и морские акватории, и территории суши, число обнаруженных по спутниковым данным айсбергов умножается на коэффициент, равный отношению площади полного квадрата сетки и площади морской поверхности в данном квадрате (S_i). Плотность айсбергов в таких квадратах определяется как: $k = (N/d) \cdot (625/S_i)$.

Критерии айсберговой опасности

Для количественной оценки айсберговой опасности предлагается использовать в качестве основного критерия среднемесячную величину плотности айсбергов, наблюдавшихся в квадрате картографической сетки по спутниковым данным за 1 сутки. В работе расчеты приведены для квадрата сетки 25×25 км. Предлагаемые критерии айсберговой опасности определяются в баллах. Алгоритм расчета айсберговой опасности применяется в двух вариантах — для зимне-весеннего периода и для летне-осеннего.

Летне-осенний период

В летне-осенний период по снимкам регистрируются айсберги на открытой воде, айсберги в дрейфующем льду и айсберги, сидящие на грунте на открытой воде и среди дрейфующих льдов. Для каждого квадрата сетки происходит накопление случаев наблюдения айсбергов за выбранный временной интервал (месяц года). Оценка айсберговой опасности производится с помощью балльной шкалы.

Квадратам сетки, по которым за период наблюдения (2014–2023 гг.) не было обнаружено айсбергов, присваивается значение 0 баллов айсберговой опасности; для квадратов, в которых в среднем за сутки по данным 2012–2022 гг. обнаружено 1–5 айсбергов, присваивается 1 балл опасности; для квадратов со средним ежесуточным числом айсбергов 6–49 — 2 балла; 50–100 — 3 балла; 101–200 — 4 балла; более 200 айсбергов — 5 баллов.

Дополнительно добавляется по 1 баллу, если в квадрате наблюдались обширные айсберги (>200 м), либо айсберги с высотой надводной части более 25 м, либо айсберги, сидящие на грунте, а также айсберги, дрейфующие с высокими скоростями (>1 км/ч). Дополнительные баллы присваиваются в случае обнаружения хотя бы одного айсберга, удовлетворяющего условиям по каждой из перечисленных категорий.

Зимне-весенний период

В зимне-весенний период айсберги фиксируются в припае и среди дрейфующих льдов (в том числе сидящие на грунте). Айсберги в припае блокируются припайным льдом и несколько месяцев имеют на снимках постоянное местоположение. Для регистрации припайных айсбергов достаточно одной спутниковой съемки по каждому квадрату сетки. Критериями айсберговой опасности являются те же, что и перечисленные выше для летне-осеннего периода. Вне припая процедура определения количества айсбергов в квадратах сетки аналогична применяемой для летне-осеннего сезона. Квадраты, в которые попадает и припайный лед, и дрейфующий (или открытая вода), рассматриваются как совокупность 2 участков наблюдений — район с постоянным числом объектов (неподвижные айсберги) и район с переменным числом (дрейфующие айсберги и сидящие на мели).

Длина айсберга как дополнительный критерий айсберговой опасности

Дополнительный критерий айсберговой опасности, зависящий от размера объекта, был выбран исходя из известной критической массы айсберга, особо опасной для морских инженерных сооружений. При проектировании сооружений нефтедобывающих комплексов на шельфе арктических морей критической айсберговой угрозой считается столкновение с айсбергом массой 1 млн т. Так, канадская нефтяная платформа гравитационного типа «Хайберния» рассчитана на возможность столкновения без катастрофических последствий с айсбергом массой 1 млн т [2].

Для определения массы айсберга с использованием спутниковой информации необходимо знать площадь его сечения по ватерлинии и высоту айсберга, включающую надводную и подводную части. Высота надводной части айсбергов определялась по длине тени от них, измеренной по спутниковому снимку и известной из метаданных снимка высоте солнца над горизонтом. Средняя высота надводной части обширных айсбергов была оценена для целей настоящей работы по спутниковым наблюдениям айсбергов, дрейфовавших в 2015 г. в море Лаптевых. По выборке из 40 айсбергов эта высота составила 11 м. Для расчета общей высоты айсберга использована оценка соотношения надводной и подводной частей айсберга как 1:4, полученная И.В. Бузиным с соавторами [4] по результатам натурных исследований в Баренцевом море. Форма айсберга при этом не учитывается, хотя наблюдения у берегов Канады показали, что существует зависимость соотношения высоты надводной и подводной частей айсберга от его формы. В частности, например, общая высота остроконечного айсберга вдвое меньше, чем у столообразного айсберга, при одинаковой высоте надводной части [10].

Соотношение длины (L) и ширины (d) арктических айсбергов, полученное авторами при анализе данных спутникового мониторинга айсбергов в море Лаптевых, в среднем близко к значению 2:1. При этих допущениях масса обширного айсберга длиной 200 м при представлении как призмы с прямоугольной площадью сечения по ватерлинии, с учетом плотности морского льда $0,92 \text{ т/м}^3$, составит $Ld5hp = 200 \cdot 100 \text{ м}^2 \cdot 55 \cdot 0,92 = 1\,012\,000 \text{ т}$.

В реальных условиях, конечно, площадь сечения айсберга отличается от прямоугольной, и описываемый айсберг — только абстрактное объемное тело для упрощения расчетов. Для проверки гипотезы о том, что обширные айсберги с длиной более 200 м являются миллионниками (т. е. их масса превосходит 1 млн т), была исследована выборка из 30 айсбергов с длиной от 200 до 375 м, обнаруженных по спутниковым данным в море Лаптевых в 2015 г. Масса айсбергов рассчитывалась с учетом сделанных выше предположений, по приближенной оценке. Средняя масса айсбергов составила 1,6 млн т. Масса 6 айсбергов была ниже 1 млн т, наименьший из

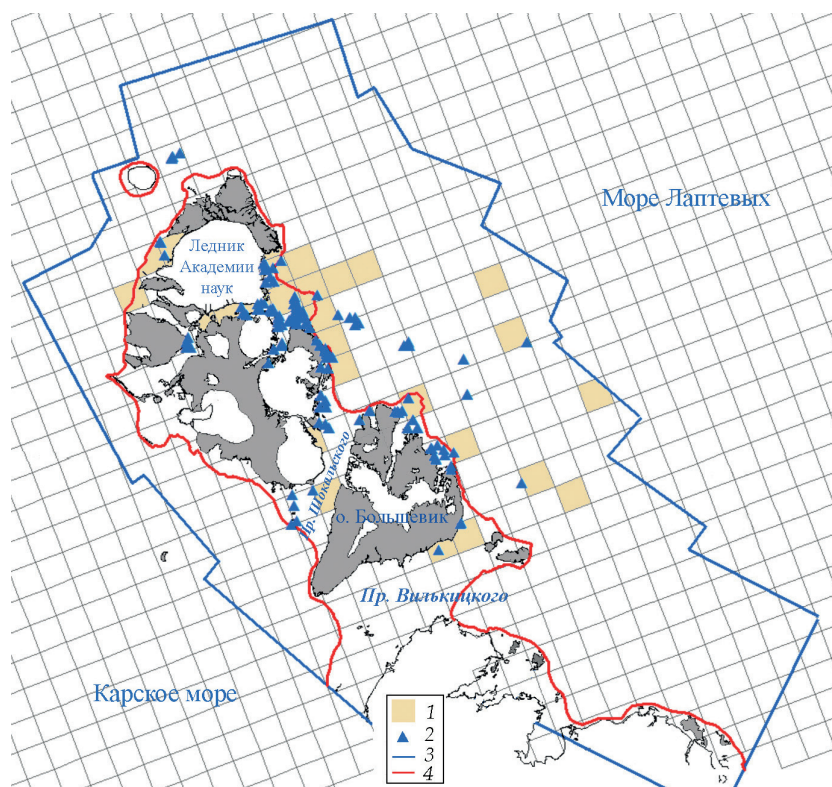


Рис. 1. Районы обнаружения близ Северной Земли по спутниковым снимкам Landsat-8 обширных айсбергов и айсбергов с надводной частью выше 25 м. Весна 2020 г.

1 — районы нахождения айсбергов длиной свыше 200 м; 2 — районы нахождения айсбергов с надводной частью свыше 25 м; 3 — контуры района, охваченного съемкой Landsat-8; 4 — граница припая

Fig. 1. Areas of detection of extensive icebergs and icebergs with a sale height of more than 25 m near Severnaya Zemlya according to Landsat-8 satellite images. Spring 2020.

1 — areas of icebergs with a length of over 200 m; 2 — areas of icebergs with a sale height of more than 25 m; 3 — contours of the area covered by Landsat-8 images; 4 — fast ice boundary

них имел расчетную массу 0,5 млн т. Масса наибольшего айсберга (230×130 м, высота 22 м) была оценена в 4,5 млн т.

На рис. 1 для примера показаны районы, в которых весной 2020 г. по спутниковым снимкам были обнаружены айсберги длиной свыше 200 м.

Высота надводной части айсберга как дополнительный критерий айсберговой опасности

Большая часть обнаруженных обширных айсбергов имела столбообразную форму, такие айсберги отличает сравнительно невысокая надводная часть в сравнении с айсбергами ряда других форм, в частности пирамидальных. Считается, что высота надводной части арктических айсбергов преимущественно ниже 25 м [11]. Однако в районе Северной Земли по спутниковым наблюдениям доля высоких айсбергов может быть достаточно существенна. Так, в 2020 г. из 4241 айсберга 134 (3,2 %) имели высоту надводной части от 25 до 46 м, в среднем 30 м. Распространение таких айсбергов по акватории на примере 2020 г. показано на рис. 1. При тех же допущениях по соотношению длина/ширина и надводная/подводная части айсбергов, как это было принято выше, критической массы в 1 млн т высокие (пирамидальные и т. п.) айсберги высотой 30 м достигают при длине в 115 м. Высота надводной части айсберга 25 м была выбрана в качестве дополнительного критерия айсберговой опасности. По спутниковым данным видимого диапазона этот критерий определяется в зимне-весенний период, когда тень от айсберга различима на фоне более яркого льда. Летом идентифицировать тень от айсберга на фоне открытой воды (низкой яркости на снимке) не удастся.

Айсберговые ловушки как дополнительный критерий айсберговой опасности

Еще один предложенный критерий айсберговой опасности — это наличие в квадрате сетки в какой-либо год (или годы) наблюдения айсберга, сидящего на грунте. Этот факт отражает наличие в квадрате наблюдения ловушек для айсбергов, при попадании в которые вероятность столкновения с айсбергом повышается.

Для выявления районов, в которых айсберги садятся на грунт, была применена методика обнаружения таких айсбергов по разводьям в ледяном покрове, которые образуются при натекании дрейфующего льда на неподвижный айсберг. Направление разводий совпадает с направлением дрейфа льда. Методика основана на анализе спутниковых снимков методом сверточных нейронных сетей. Наиболее эффективна методика в начале весны. В этот период в марте-апреле в морях Арктической зоны РФ ледяной покров достигает максимального развития за сезон. Толщина дрейфующего однолетнего льда увеличивается до 1 м и более. В то же время дрейфующие айсберги эпизодически садятся на мели и становятся препятствием для дрейфующих льдов. Неподвижные айсберги прорезают надвигающийся на них лед, в результате за каждым таким айсбергом образуется разводье. Как показал анализ спутниковых снимков Landsat-8 за 2014–2023 гг. по району моря Лаптевых у побережья Северной Земли, направление такого разводья совпадает с направлением дрейфа льда, а ширина соответствует сечению боковой поверхности айсберга, взаимодействующей с натекающим ледяным потоком. При сохранении направления дрейфа льда в течение нескольких суток длина разводья может достичь 10 км. Разводья таких размеров могут быть легко обнаружены экспертом на спутниковых снимках. Таким образом, для обнаружения разводий за неподвижными айсбергами в дрейфующем льду может быть использован косвенный признак: разводья за айсбергами в районе мониторинга

параллельны друг другу, а их направление совпадает с направлением общего дрейфа льда. Этот признак был использован для автоматизированного обнаружения разводов подобного типа методом сверточных нейронных сетей.

Нейросетевой алгоритм поиска на изображении неподвижных айсбергов, стоящих в дрейфующем льду, реализует обнаружение однонаправленных разводов, образующихся за яркими квазиточечными объектами на снимке. Направление искомым разводов задается равным направлению дрейфа льда в конкретном районе моря в рассматриваемый период.

Алгоритм поиска неподвижных айсбергов в дрейфующем льду основан на сверточной нейронной сети архитектуры U-Net, настроенной по трем каналам видимого диапазона аппаратуры OLI Landsat-8: 4-й (0,630–0,680 мкм), 3-й (0,525–0,600 мкм) и 2-й (0,450–0,515 мкм). Пространственное разрешение снимков 30 м.

Обученная нейросеть выделяет на спутниковом изображении 2 класса: разводья и неразводья. В качестве функции потерь была выбрана бинарная кросс-энтропия, позволяющая эффективно оценить разницу между истинными и предсказанными вероятностями каждого класса. Набор данных, использованный для работы нейросети, состоял из 65949 RGB-фрагментов изображений размером 256×256 пикселей. Соответствующие им маски были представлены в бинарном формате со значениями 0 и 1. Для обучения нейронной сети было выделено 52760 изображений, а для валидации — 13189. Области суши и зоны сплошной облачности на снимках ма-

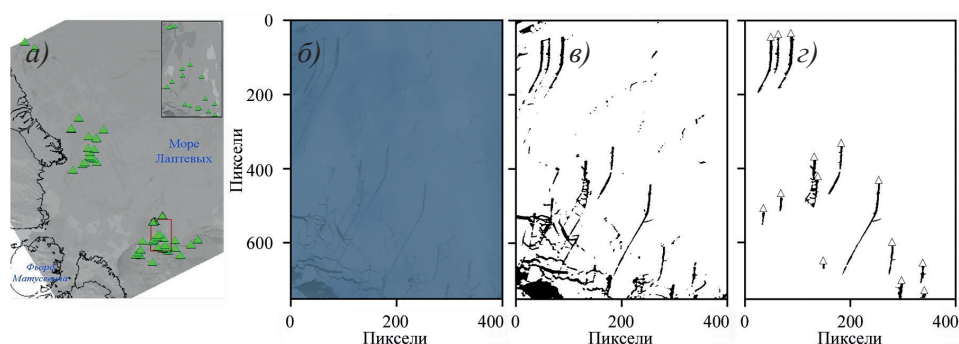


Рис. 2. Пример обнаружения айсбергов, сидящих на грунте, по спутниковым снимкам Landsat-8, с помощью метода сверточных нейронных сетей:

a — исходный снимок, 15 марта 2015 г., восточное побережье Северной Земли; треугольники обозначают обнаруженные айсберги на грунте; на врезке — увеличенный фрагмент снимка, обозначенный красной рамкой; *б* — фрагмент снимка Landsat-8, в формате RGB за 15 марта 2015 г. (положение фрагмента обозначено красной рамкой на рис. 2*a*); *в* — результаты обнаружения разводов на фрагменте снимка Landsat-8 (рис. 2*б*) с помощью сверточной нейронной сети; *г* — обнаружение разводов за айсбергами, стоящими на грунте, с помощью фильтрации схемы разводов (рис. 2*в*) по направлению «север–юг»

Fig. 2. Example of the detection of grounded icebergs from Landsat-8 satellite images using the convolutional neural network method:

a — the original image, March 15, 2015, the eastern coast of the Severnaya Zemlya; the triangles indicate grounded icebergs; the inset shows an enlarged fragment of the image, indicated by a red frame; *б* — a fragment of the image for March 15, 2015 (the position of the fragment is indicated by a red frame in Fig. 2*a*); *в* — leads behind grounded icebergs detected by a convolutional neural network. March 15, 2015 (Fig. 2*б*); *г* — leads behind grounded icebergs detected by Fig. 2*в* after filtering in the north-south direction; the triangles indicate grounded icebergs

скировались. Результатом работы сети является изображение, визуализирующее вероятность наличия разводий. Значения вероятности, близкие к 1, указывают на наличие трещин во льду (объектов сегментации). Для выделения класса разводий и получения бинарной маски (рис. 2в) был установлен порог вероятности в 0,5, превышение которого соответствовало высокой вероятности принадлежности пикселя к классу разводий.

Для оценки производительности модели во время обучения были использованы две метрики: IoU (Intersection over Union) и accuracy (точность). Метрика accuracy измеряет долю правильно классифицированных пикселей из общего числа пикселей изображения. На валидационном наборе данных измеренная точность составила 0,97, что соответствует хорошему уровню классификации модели.

Метрика IoU (Intersection over Union) является частным случаем индекса Жаккара и позволяет оценить качество сегментации изображений. Формула для функции IoU вычисляет коэффициент пересечения и объединения (IoU) для двух масок (истинной и предсказанной) на пиксельном уровне, а затем суммирует эти значения по всем пикселям изображения. Результат делится на сумму значений истинной и предсказанной масок:

$$\text{IoU} = \frac{|A \cap B|}{|A \cup B|},$$

где A — истинные значения, B — предсказанные значения.

В итоге функция возвращает среднее значение коэффициента пересечения и объединения для всех элементов в пакете данных. Оцененное значение IoU составило 0,52.

Обученная нейросеть успешно распознает разводья во льду (рис. 2в). После фильтрации обнаруженных разводий с выделением разводий, совпадающих с направлением дрейфа льда, на обработанном снимке остаются только разводья, образованные при прохождении дрейфующего льда через район расположения айсбергов, стоящих на мели. Так, на фрагменте снимка Landsat-8 за 15 марта 2015 г. (рис. 2а, б) ледовый эксперт обнаружил 17 стоящих на грунте айсбергов, размером от 60 до 168 м каждый. Нейросеть после фильтрации найденных разводий по направлению «север–юг» обнаружила 15 однонаправленных разводий, отходящих от 15 айсбергов (рис. 2г).

Скорость айсберга как дополнительный критерий айсберговой опасности

Кинетическая энергия айсберга является важным показателем его опасности в случае столкновения с объектом морской инфраструктуры или с судном. По спутниковым данным скорость перемещения крупного айсберга может быть определена по серии последовательных снимков путем создания шаблона этого айсберга и дальнейшего его отслеживания. В видимом диапазоне спектра слежение за айсбергом из-за облачности выполняется в неэквидистантные промежутки времени, поэтому могут возникать ситуации, когда айсберг может быть «потерян» (ушел из зоны съемки, разрушился с образованием мелких обломков, перевернулся...). Как правило, наблюдение за дрейфом крупного айсберга (длиной более 100 м) по спутниковым данным удастся осуществить за промежуток времени от 1 до 3,5 мес. Весной айсберги во многих районах Арктики перемещаются вместе с дрейфующим однолетним льдом сплоченностью выше 90 %, скорость дрейфа айсбергов равняется скорости дрейфа ледяных полей. По мере разрушения ледяного покрова летом айсберги дрейфуют

самостоятельно на открытой воде или среди разреженного льда. Инструментальные наблюдения по данным радиомаяков (с дискретностью 1 час), выполненные в 2013–2015 гг. ПАО «НК «Роснефть»», показали, что средняя скорость дрейфа ледяных полей на акваториях морей Карского и Лаптевых практически не меняется и составляет 16–17 см/с [11–14]. В то же время наибольшая известная зарегистрированная инструментальными средствами скорость дрейфа арктических айсбергов составляет 1–1,1 м/с (измерения радиомаяков в Баренцевом море) [14]. Такая скорость дрейфа айсбергов, рассчитанная по спутниковым данным, не встречалась. В настоящей работе максимальная скорость дрейфа айсбергов в море Лаптевых у Северной Земли, по спутниковым данным 2015–2020 гг., составила 34 см/с (1,2 км/ч). Однако следует учесть, что данные буев и спутниковые наблюдения имеют разную дискретность. По спутниковым данным оценка скорости перемещения айсбергов производилась за временной интервал в сутки и более, тем самым получались осредненные величины дрейфа. С учетом этих особенностей наблюдения величина скорости айсбергов 1 км/ч была выбрана в качестве дополнительного критерия айсберговой опасности.

Результаты и обсуждение

Применение предложенных критериев айсберговой опасности на основе анализа снимков Landsat-8 позволило получить ежесуточную плотность айсбергов в районе Северной Земли за разные сезоны в период 2014–2023 гг. и оценить айсберговую опасность в различных участках этого региона. На рис. 3 приведены примеры оценки айсберговой опасности, полученные для весеннего сезона (март–май) 2015, 2020, 2023 гг. В 2015 г. при анализе использовано 38 снимков Landsat-8, в 2020 г. — 31 снимок, в 2023 г. — 20 снимков.

Анализ спутниковой информации по району Северной Земли за 2014–2023 гг. с использованием предложенных критериев айсберговой опасности позволил выявить следующие наиболее айсбергоопасные районы, в которых среднесуточная плотность айсбергов превышает 200 объектов на квадрат 25×25 км (рис. 3):

- пролив Красной Армии;
- фьорд Матусевича и прилегающие квадраты моря Лаптевых;
- прибрежная зона моря Лаптевых у ледника Академии наук (о. Комсомолец).

На западном побережье Северной Земли наибольшая плотность айсбергов (4 балла, 101–200 объектов) наблюдалась вблизи ледника Вавилова и в заливе Ковалевской.

Плотность айсбергов в проливе Шокальского (до 4 баллов) выше, чем в проливе Вилькицкого (до 2 баллов). Плотность айсбергов у Северной Земли в море Лаптевых выше, чем в Карском море.

В море Лаптевых отмечается высокая межгодовая пространственная изменчивость плотности айсбергов, обусловленная изменчивостью преобладающих метеорологических процессов. Весной 2015 г., например, отмечался значительный дрейф айсбергов вдоль Северной Земли на север, в этот год зарегистрирована повышенная плотность айсбергов северо-восточнее о. Комсомолец. Такая же ситуация наблюдалась весной 2018 г. [15]. Весной 2020 г., напротив, плотность айсбергов в этом районе была минимальна, часть из них перемещалась на юг.

Айсберговые ловушки в разные годы также были по-разному заполнены айсбергами. В 2015 г. больше севших на мель айсбергов отмечено в северной части прибрежной зоны архипелага, а в 2020 г. — в южной зоне (см. области 4 на рис. 3).

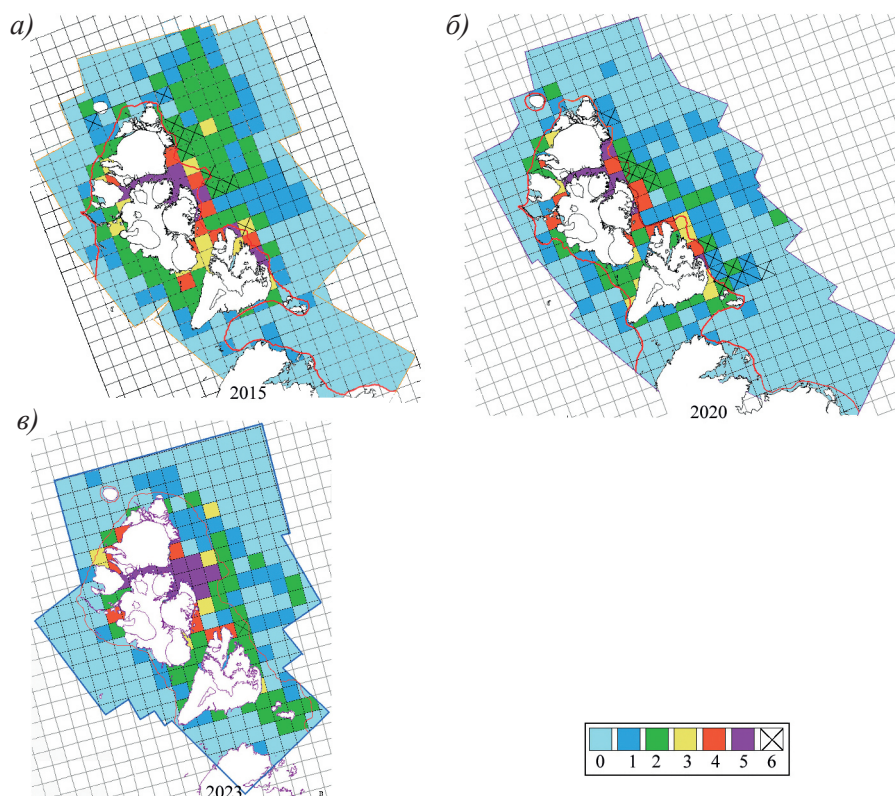


Рис. 3. Оценка айсберговой опасности в районе Северной Земли весной 2015 (а), 2020 (б), 2023 (в) гг. По данным спутниковых снимков Landsat-8 за март–май.

Квадраты, по которым получены информативные спутниковые снимки, выделены цветом. 0 — айсберги не обнаружены; 1 — 1–5 айсбергов; 2 — 6–49 айсбергов; 3 — 50–100 айсбергов; 4 — 101–200 айсбергов; 5 — > 200 айсбергов; 6 — места обнаружения айсбергов на грунте. Красной линией обозначена граница припая

Fig. 3. Assessment of iceberg hazard in the Severnaya Zemlya region in the spring of 2015 (a), 2020 (b), 2023 (c). Based on Landsat-8 satellite images for March–May.

The squares from which informative satellite images were obtained are highlighted in color. 0 — no icebergs detected; 1 — 1–5 icebergs; 2 — 6–49 icebergs; 3 — 50–100 icebergs; 4 — 101–200 icebergs; 5 — > 200 icebergs; 6 — places where grounded icebergs were detected

Этот факт также объясняется различием в интенсивности и преимущественном направлении дрейфа айсбергов в эти годы. В 2023 г. айсберги в ловушках были отмечены только в одном квадрате (рис. 3в). Ежегодно весной для снижения айсберговой угрозы судоходству имеет смысл проводить мониторинг айсбергов, сидящих на мели, и создавать базу данных об их местонахождении и параметрах. Такие айсберги могут находиться в одной точке по несколько месяцев, а иногда и лет, как это было, например, отмечено в заливе Ковалевской [16], пока их подводная часть не будет частично разрушена под воздействием волновых процессов и из-за таяния при контакте с более теплой водой.

Районы нахождения обширных айсбергов в разные годы наблюдений были приурочены к одним и тем же районам, связанным с местами генерации айсбергов, — проливу Красной Армии, фьорду Матусевича, восточному склону ледника

Академии наук и др. Количество обширных айсбергов менялось. Максимум айсбергов длиной свыше 200 м отмечался в 2015 г. — 457 единиц (6,1 %), в 2023 г. таких айсбергов было 3,1 % (172 шт.). Факт уменьшения количества обширных айсбергов объясняется тем, что в 2014 г. было отмечено интенсивное разрушение шельфового ледника Матусевича, а в последующие годы разрушение этого ледника замедлилось.

В целом знание статистических характеристик айсбергов в районах СМП может быть использовано для совершенствования методов прогноза дрейфа айсбергов [17] и повышения достоверности оценок вероятности столкновения с айсбергом охраняемых инженерных объектов шельфовой зоны.

Выводы

1. Данные регулярных спутниковых наблюдений морей Арктической зоны РФ могут быть использованы для количественной оценки айсберговой опасности в конкретных районах.

2. Основным критерием айсберговой опасности является величина среднесуточной плотности айсбергов в квадратах регулярной сетки, полученная для того или иного месяца (или сезона) года.

3. В качестве дополнительных критериев айсберговой опасности могут использоваться факты наблюдения в квадрате сетки:

- обширных айсбергов (>200 м по классификации ВМО);
- айсбергов с высотой надводной части более 25 м;
- айсбергов, сидящих на грунте;
- айсбергов, дрейфующих с высокими скоростями (>1 км/ч).

4. Для районирования акватории по степени айсберговой опасности необходим анализ спутниковых данных за статистически значимый интервал времени (не менее 10 лет).

5. Оценки айсберговой опасности, полученные на основании регулярного спутникового мониторинга, могут применяться в инженерных расчетах при проектировании объектов инфраструктуры на шельфе арктических морей, а также использоваться в региональных моделях дрейфа айсбергов для повышения достоверности прогностических оценок дрейфа.

6. Районирование акватории Северного морского пути по степени айсберговой опасности позволит учитывать фактор риска столкновений с айсбергами при прокладке маршрутов судов.

Конфликт интересов. У авторов нет конфликта интересов.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 23-27-00122).

Competing interests. The authors have no conflicts of interests.

Funding. The work under this project is supported by the Russian Science Foundation through the Project № 23-27-00122.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Абрамов В.М., Карлин Л.Н., Овсянников А.А. О структуре айсберговой опасности в окрестности Штокмановского газоконденсатного месторождения. *Ученые записки РГГМУ*. 2008;8:98–109.

Abramov V.M., Karlin L.N., Ovsiannikov A.A. On iceberg hazard structure in the Shtokman gas-condensate field area. *Uchenye zapiski RGGMU = RSHU*. 2008;8:98–109. (In Russ.)

2. Онищенко Д.А. Вероятностные аспекты оценки ледовых нагрузок и воздействий на объекты обустройства морских месторождений на примере айсберговой угрозы. *ROGTEC. Российские нефтегазовые технологии*. 2014;37:80–88.
Onishchenko D.A. Offshore hazards: assessing the impact of icebergs on offshore production platforms. *Rossiiskie neftegazovye tekhnologii = Rogtecmagazine*. 2014;37:80–88. (In Russ.)
3. Онищенко Д.А., Сафонов В.С. О необходимости учета айсберговой опасности при обосновании концепции освоения арктических месторождений углеводородов. *Вестни газовой науки*. 2017;1(29):100–118.
Onishchenko, D.A., Safonov V.S. On necessity to consider the iceberg threat at substantiation of a concept for development of Arctic hydrocarbon fields. *Vesti Gazovoy Nauki: collected scientific technical papers*. 2017;1(29):100–118. (In Russ.)
4. Бузин И.В., Глазовский А.Ф., Гудошников Ю.П., Данилов А.И., Дмитриев Н.Е., Зубакин Г.К., Кубышкин Н.В., Наумов А.К., Нестеров А.В., Скутин А.А., Скутина Е.А., Шибаккин С.И. Айсберги и ледники Баренцева моря: Исследования последних лет. Часть 1. Основные продуцирующие ледники, распространение и морфометрические особенности айсбергов. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2008;1(78):66–79.
Buzin I.V., Glazovsky A.F., Glazovsky A.F., Gudoshnikov Yu.P., Danilov A.I., Dmitriev N.E., Zubakin G.K., Kubyshev N.V., Naumov A.K., Nesterov A.V., Skutin A.A., Skutina E.A., Shibakin S.I. Icebergs and glaciers of the Barents Sea. Results of the most recent research. Part 1. Main producing glaciers, their propagation and morphometric properties. *Problemy Arktiki i Antarktiki = Arctic and Antarctic Research*. 2008;78(1):66–79. (In Russ.)
5. Бузин И.В., Глазовский А.Ф., Май Р.И., Миронов Е.У., Нестеров А.В., Наумов А.К., Гудошников Ю.П. Исследование динамики и морфометрии ледников и айсбергов и прикладное использование полученных результатов при освоении углеводородных месторождений на континентальном шельфе Российской Арктики. *Вестник РФФИ*. 2020;107–108(3–4):21–37. <https://doi.org/10.22204/2410-4639-2020-106-107-3-4-21-37>
Buzin I.V., Glazovsky A.F., May R.I., Mironov Y.U., Nesterov A.V., Naumov A.K., Gudoshnikov Yu.P. Study of Dynamics and Morphometry of Glaciers and Icebergs and Application of the results for the development of the hydrocarbon deposits on the continental shelf of the Russian Arctic. *Vestnik RFFI = RFBR*. 2020; 3–4 (107–108):21–37. (In Russ.). <https://doi.org/10.22204/2410-4639-2020-106-107-3-4-21-37>
6. Май Р.И., Гузенко Р.В., Миронов Е.У., Наумов А.К., Скутин А.А., Скутина Е.А., Соболюк Д.И., Замарин Г.А., Корнишин К.А., Ефимов Я.О., Мамедов Т.Е. Морфометрия и масса айсбергов в российских арктических морях. *IJOPE*. 2019;29(4):375–382. <https://doi.org/10.17736/ijope.2019.jc770>
7. Тиугалева А., Гузенко Р., Клычаккин С., Май Р. Метод оценки опасности айсбергов в Карибском море, основанный на реализациях численной модели. In Proc. 19th Int. Multidisc. Sci. GeoConf. “SGEM 2019”. Bulgaria, Albena, 30 June – 6 July, 2019. Bulgaria, Sofia; 2019. P. 977–984. <https://doi.org/10.5593/sgem2019/1.2/S06.124>
8. Bigg G.R., Cropper T.E., O'Neill C.K., Arnold A.K., Fleming A.H., Marsh R., Ivchenko V., Fournier N., Osborne M., Stephens R. A model for assessing iceberg hazard. *Nat Hazards*. 2018;92:1113–1136. <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3243-x>
9. Бычкова И.А., Платонова Е.В., Смирнов В.Г. Особенности совместного использования спутниковых данных видимого диапазона и радиолокационных данных для мониторинга арктических айсбергов на примере района Земли Франца-Иосифа. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2023;69(2):191–205. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-2-191-205>
Bychkova I.A., Platonova E.V., Smirnov V.G. Features of the joint use of visible-range satellite and satellite radar data for monitoring arctic icebergs based on data from Franz Josef Land area. *Arctic and Antarctic Research*. 2023;69(2):191–205. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-2-191-205>

10. Lee T.K., Park H.-J. Review of ice characteristics in ship-iceberg collisions. *Journal of Ocean Engineering and Technology*. 2021;35(5):369–381. <https://doi.org/10.26748/KSOE.2021.060>
11. Миронов Е.У. (ред.) *Опасные ледовые явления для судоходства в Арктике*. СПб.: Изд-во ААНИИ; 2010. 319 с.
12. Бузин И.В., Миронов Е.У., Сухих Н.А., Павлов В.А., Корнишин К.А., Ефимов Я.О. Исследования дрейфа ледяных образований на шельфе Российской Арктики с помощью автоматических радиомаяков спутниковой системы ARGOS. *Научно-технический вестник ОАО «НК «Роснефть»*. 2016;45(4):4–9.
Buzin I.V., Mironov E.Yu., Sukhikh N.A., Pavlov V.A., Kornishin K.A., Efimov Ya.O. Investigation of drift of the ice features on the Russian Arctic offshore with the help of automatic radio beacons based on the ARGOS satellite system. *Nauchno-tekhnicheski vestnik "Rosneft" = Collected scientific technical papers "Rosneft Oil Company PJSC"*. 2016;45(4):4–9. (In Russ)
13. Buzin I.V., Nesterov A.V., Gudoshnikov Yu.P., Pashali A.A., Kornishin K.A., Efimov Ya.O., Stragnikov D.S. The preliminary results of iceberg drift studies in the Russian Arctic throughout 2012–2017. *IJOPE*. 2019;29(4):391–399. <https://doi.org/10.17736/ijope.2019.jc772>
14. Бузин И.В., Нестеров А.В. Ледовые нагрузки: отследить и предупредить. *Neftegaz.RU*. 2018;73(1):16–23. URL: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/arktika/512776-ledovye-nagruzki-otsledit-i-predupredit>
Buzin I.V., Nesterov A.V. Ice loads: track and warn. *Neftegaz.RU*. 2018;73(1):16–23. URL: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/arktika/512776-ledovye-nagruzki-otsledit-i-predupredit> (In Russ.) (accessed 15.04.2024)
15. Бычкова И.А., Смирнов В.Г. Изучение дрейфа айсбергов у побережья Северной Земли весной 2018 г. с помощью спутниковой информации. *Лед и снег*. 2019;59(3):377–387. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-3-411>
Bychkova I.A., Smirnov V.G. The iceberg drift study near Severnaya Zemlya in the spring of 2018 by remote sensing data. *Led i sneg = Ice and Snow*. 2019;59(3):377–387. (In Russ.). <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-3-411>
16. Смирнов В.Г., Бычкова И.А. Спутниковый мониторинг ледяных образований при обеспечении безопасности работ на шельфе арктических морей. *Исследование Земли из космоса*. 2015;4:79–87. <https://doi.org/10.7868/S0205961415040107>
Smirnov V.G., Bychkova I.A. Satellite monitoring of ice formations while ensuring the safety of work on the shelf of the Arctic seas. *Issledovanie Zemli iz kosmosa = Earth Observation and Remote Sensing*. 2015;4:79–87. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0205961415040107>
17. Миронов Е.У., Смирнов В.Г., Бычкова И.А., Кулаков М.Ю., Демчев Д.М. Новые технологии обнаружения айсбергов и прогнозирования их дрейфа в западном секторе Арктики. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2015;104(2):21–32.
Mironov Ye.U., Smirnov V.G., Bychkova I.A., Kulakov M.Yu., Demchev D.M. Modern technologies for iceberg detection and their drift forecasting in the western Arctic. *Problemy Arktiki i Antarktiki = Arctic and Antarctic Research*. 2015;104(2):21–32. (In Russ.)

СТРАНИЦЫ ИСТОРИИ PAGES OF HISTORY

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-2-253-270>

УДК 551.467



Изучение физических свойств льда в России и СССР (конец XIX в. — 1940 г.). Упругость и вязкость льда

К.Е. Сазонов^{1,2}✉

¹ Крыловский государственный научный центр, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,
Санкт-Петербург, Россия

✉ K_Sazonov@ksrc.ru

КЕС, 0000-0003-3364-1309

Аннотация. В работе рассматривается история изучения в России и СССР (конец XIX в. — 1940 г.) таких характеристик льда, как упругость и вязкость. Для изучения этих важных характеристик требуется наличие специальной довольно точной аппаратуры, позволяющей измерять небольшие деформации. Это обстоятельство явилось серьезным препятствием для развития исследований. Первые в России исследования коэффициента внутреннего трения льда были выполнены Б.П. Вейнбергом на сконструированном и изготовленном им приборе. В ходе этих исследований были получены данные о вязкости льда, а также о его модуле сдвига. Эти исследования носили академический характер и не были обусловлены запросами практики. Примерно в это же время исследованиями упругих и вязких свойств ледяного покрова занимались специалисты по строительству и эксплуатации ледовых железнодорожных переправ. Их усилия были сконцентрированы на изучении прогибов льда под нагрузкой с помощью стандартных приборов, применявшихся на железнодорожном транспорте и в мостостроении. Лишь в 1920-х гг. необходимость в определении предела упругости возникла в связи с разработкой первых математических моделей работы железнодорожной переправы Б.Н. Сергеевым и С.А. Бернштейном. Ими предприняты попытки восстановления значения модуля упругости по данным измерения прогибов льда на переправах. В советский период изучение упругих и вязкостных свойств льда практически не проводилось. Наиболее интересные исследования были выполнены В.Н. Пинегиным в 1922–1925 гг. В конце 30-х гг. В.К. Маклашиным были поставлены опыты по определению коэффициента всестороннего сжатия льда. Однако его работа содержит большое количество существенных неточностей, которые вызывают некоторое недоверие к полученным результатам. Малое количество исследований в России упругости и вязкости льда может быть объяснено отсутствием практической потребности в этих данных.

Ключевые слова: вязкость, коэффициент внутреннего трения льда, ледовая железнодорожная переправа, модуль сдвига, модуль упругости, Б.П. Вейнберг, С.А. Бернштейн

Для цитирования: Сазонов К.Е. Изучение физических свойств льда в России и СССР (конец XIX в. — 1940 г.). Упругость и вязкость льда. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2024;70(2):253–270. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-2-253-270>

Поступила 18.12.2023

После переработки 19.04.2024

Принята 02.05.2024

Studies of ice physical properties in Russia and USSR (late XIXth century — 1940). Ice elasticity and viscosity

Kirill E. Sazonov^{1,2✉}

¹ *Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia*

² *St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia*

✉ K_Sazonov@ksrc.ru

 KES, 0000-0003-3364-1309

Abstract. The paper deals with studies of ice elasticity and viscosity conducted in Russia and the USSR from the late XIXth century till 1940. Research of these important characteristics requires special-purpose instruments of sufficient precision to measure small deformations. It was a serious challenge impeding further investigations. B.P. Veinberg was the first in Russia to examine these properties in 1905–1906 using an instrument specially designed and manufactured for this purpose. In the course of his studies, he obtained data on the ice internal friction coefficient and shear modulus. This research was of purely academic nature and was not meant to include practical issues. Around the same time the elastic and viscous properties of the ice cover started to be examined by researchers involved in the construction and maintenance of railway river crossings. Their efforts focused on ice deflections under load, which they studied using standard devices applied in railway transport and bridge construction. The need to determine the elastic limit emerged only in the 1920s in connection with the first mathematical models of railway crossings developed by B.N. Sergeyev and S.A. Bernstein. They attempted to infer the elasticity modulus from ice deflections measured at railway crossings. In the Soviet period, studies of the elastic and viscous properties of ice were almost abandoned. The most interesting investigations were carried out by V.N. Pinegin in 1922–1925. In the late 1930s, V.K. Maklashin conducted experiments to determine the ice compressibility coefficient. However, his work contained a lot of major inaccuracies, which raised some doubts as to the results he obtained. Little research done in Russia on ice elasticity and viscosity can be attributed to the lack of practical interest in the data regarding these ice properties.

Keywords: elasticity modulus, internal friction coefficient of ice, railway river crossing over ice, shear modulus, viscosity, B.P. Veinberg, S.A. Bernstein

For citation: Sazonov K.E. Studies of ice physical properties in Russia and USSR (late XIXth century — 1940). Ice elasticity and viscosity. *Arctic and Antarctic Research*. 2024;70(2):253–270. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-2-253-270>

Received 18.12.2023

Revised 19.04.2024

Accepted 02.05.2024

Введение

Изучение законов деформирования твердых тел имеет долгую историю. Серьезные исследования начались в XVII в. и связаны с именами З. Гука и Э. Мариотта [1]. Этими же учеными был установлен линейный закон связи между деформациями

и действующими напряжениями (закон Гука)¹. Концепция модуля упругости (модуля Юнга) была разработана в 1766 г. Л. Эйлером за 80 лет до того, как Т. Юнг ввел соответствующие понятия². Дальнейшие исследования модуля упругости привели ученых к выводу о том, что эта величина является важной характеристикой материала, которая не зависит от размеров и плотности образца. Начиная с экспериментальных исследований Ш.О. Кулона (1784 г.) было установлено, что в материалах могут развиваться пластические и вязкие деформации.

Исследованию упругости, пластичности и вязкости льда в конце XIX в. был посвящен ряд исследований зарубежных авторов. Основные результаты, полученные ими, описаны в монографиях Х. Барнеса [2, 3]. Их сводная таблица, заимствованная из работы [3], приводится ниже.

Таблица 1

Результаты зарубежных исследователей
по измерению упругих и вязких характеристик льда

Table 1

Findings of foreign researchers on elastic and viscous characteristics of ice

Наблюдатель	Вид льда	Модуль Юнга, кг/см ²	Вязкость (CGS)
Мослей, 1871	—	92700	—
Беван, 1826	—	60000	—
Рейш, 1864	Чистый лед	23632	—
Гесс, 1904	Чистый и глетчерный лед	27600	—
Мак-Коннель, 1888	Обыкновенный лед	—	3·10 ¹⁰
Мак-Коннель, 1891	То же	—	134·10 ¹⁰
Гесс, 1902	То же	—	порядка 10 ¹⁰
Дилей, 1908	Глетчерный лед	—	1,25·10 ¹⁰

Изучение литературных источников показывает, что в России и СССР исследователи ледяного покрова практически не интересовались упругими, пластическими и вязкими характеристиками льда. Большинство авторов пользовались теми или иными зарубежными данными. В распространенных сводках, из которых исследователи могли подчерпнуть необходимые данные о свойствах льда, содержится следующая информация:

– Энциклопедический словарь Брокгауза и Ефрона [4, с. 472] — 77109 кг/см² по Трубриджу для модуля упругости пресного льда.

– В обзорной работе Н.А. Рынина «Ледорезы» [5, с. 16] указано, что величина модуля упругости пресного льда изменяется в широких пределах от 4300 до 12600 кг/см² при оттепелях и между 12900–25600 кг/см² при морозе. В ней также указывается, что Франкенгейм дает цифру 54100 кг/см², а Трубридж — 77109 кг/см².

– Большие подборки данных, полученных различными авторами, содержатся в работах А.Н. Комаровского [6] и Б.П. Вейнберга [7].

¹ В соответствии с современными воззрениями закон Гука является линейной аппроксимацией экспериментальных данных. Считается, что упругость всех твердых тел является нелинейной [1].
² Т. Юнгом в литературу по механике были введены понятия «высота модуля» и «вес модуля», которые не являются характеристиками материала. Им впервые были обобщены данные об этих величинах для различных материалов, включая озерный лед. Подробнее см. [1, с. 249–257].

Тем не менее отдельные работы по упругим и вязким свойствам льда были выполнены и в нашей стране. Их истории и анализу посвящена данная статья. Работа выполнена в рамках инициативного исследования автора, посвященного истории возникновения и развития ледотехники в России.

Исследования Б.П. Вейнберга

Наиболее важные исследования в этой области были выполнены Б.П. Вейнбергом в 1904–1907 гг. Примерно в 1904 г. он приступил к работе над докторской диссертацией о внутреннем трении льда, которое имеет большое значение при рассмотрении механики движения ледника. В то время в России исследования ледников были сконцентрированы на их географическом описании [8], а вопросам течения ледника практически не уделялось внимания.

Приступив к исследованиям внутреннего трения льда, Вейнберг детально изучил работы зарубежных исследователей по этому вопросу. Первая глава его диссертации посвящена детальному их разбору, при этом особое внимание он уделяет описанию и оценке применяемых исследователями методов определения коэффициента внутреннего трения льда [9]. Этому вопросу он придавал решающее значение, еще в 1904 г. им была опубликована небольшая заметка, в которой рассматривались различные способы определения коэффициента внутреннего трения [10]. В результате проведенного анализа Вейнберг для проведения своих исследований остановился на методе кручения. При использовании этого метода коэффициент внутреннего трения η определяется по формуле:

$$\eta = \frac{2Ml}{\pi r^4 \varphi'}, \quad (1)$$

где M — крутящий момент; r — радиус цилиндрического образца; l — расстояние между двумя слоями ледяного образца, которые перпендикулярны его образующей и в которых измеряется угол поворота; φ' — скорость изменения угла закручивания одного слоя льда относительно другого.

Для реализации этого метода им был разработан и изготовлен специальный прибор (рис. 1) [11]. Как следует из приведенного рисунка, прибор состоял из неподвижной доски GH, ящика CD, который посредством горизонтальной оси соединялся с кругом AB. К этому кругу подвешивался заданный груз.

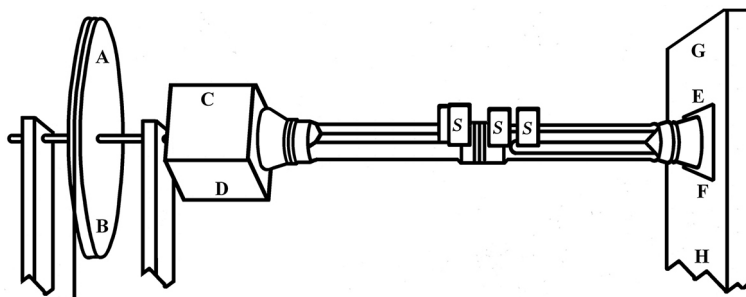


Рис. 1. Прибор, созданный Б.П. Вейнбергом для определения коэффициента внутреннего трения льда [11, с. 251]

Fig. 1. Instrument developed by B. P. Veinberg to determine the internal friction coefficient of ice [11, p. 251]

Цилиндрический образец льда закреплялся между ящиком и неподвижной доской следующим образом. В ящике и доске были проделаны конические отверстия, в которые плотно вставлялись куски льда. В этих кусках льда с помощью нагретого прутка или ножа проделывалось углубление либо отверстие. В эти углубления вставлялись концы цилиндрического образца, которые затем смерзались с кусками льда. Для ускорения процесса смерзания места крепления запломбировывались мокрым снегом или ледяной крошкой.

Для регистрации относительных угловых перемещений на ледяной образец устанавливались алюминиевые оправки, снабженные зеркальцем *s* (рис. 2). Они, как пишет Вейнберг, устроены так, «чтобы, соответственно отгибая полоску с зеркальцем в плоскости, проходящей через ось, и в плоскости, перпендикулярной оси, можно было направить в трубу пучок лучей, идущих от шкалы и отраженных от зеркальца» [11, с. 252]. Примененная в опытах форма оправок позволяла наблюдать сразу две или три оправки в трубу, а также снимать показания со слоев льда, которые отстояли дальше друг от друга, чем зеркальца.

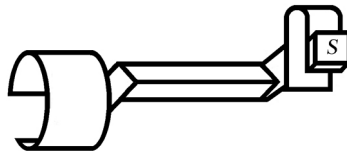


Рис. 2. Оправки для регистрации угловых перемещений [11, с. 252]

Fig. 2. Adaptors for recording angular displacements [11, p. 252]

Для приготовления цилиндрических образцов льда Вейнберг разработал специальную технологию. Сначала из кабана льда выпиливался кусок в форме прямоугольного параллелепипеда. Затем с помощью топора или ножа этому куску придавалась приблизительно цилиндрическая форма. Окончательная обработка образца осуществлялась прокаткой его по поверхности плиты или подноса, равномерно нагретых горячей водой. На завершающих этапах исследования Вейнберг изготовил специальное корытце с закругленным дном, которое помещалось в резервуар с горячей водой.

Первая серия экспериментов по кручению образцов льда была выполнена Б.П. Вейнбергом в феврале 1905 г. в Петербурге. Он проводил исследования с невским льдом. Результаты этих испытаний он изложил в статье, помещенной в престижном физическом журнале того времени “*Annalen der Physik*” [12]. Позже текст этой статьи в расширенном виде вошел в работу [11]. Всего в феврале этого года было выполнено 6 серий испытаний с цилиндрическими образцами невского льда. Наиболее успешными автор исследования считал две серии продолжительностью 56 и 220 часов. В этих сериях течение льда вышло на установившийся режим, что позволило достаточно точно определить коэффициент внутреннего трения, а также исследовать влияние на него температуры. Вейнберг делает следующие выводы из своего исследования [12]:

- коэффициент внутреннего трения невского льда при закручивании перпендикулярно оптической оси с установившейся скоростью 10^{-8} 1/с имеет порядок величины 10^{13} г/(см·с) ($5 \cdot 10^{13}$ г/(см·с) при -5 °C);
- температура оказывает заметное влияние на величину этого коэффициента.

В работе [12] для описания влияния температуры T на коэффициент внутреннего трения льда Вейнберг предложил формулу:

$$\eta_T = (1,244 - 0,502T + 0,0355T^2) \cdot 10^{13}, \text{ (г/см}\cdot\text{с)} \quad (2)$$

Эта формула получила довольно широкое распространение, например, она приводится в работах [2] и [6]. Позже, в работе [11], Вейнберг показал, что влияние температуры на коэффициент внутреннего трения льда лучше описывается выражением:

$$\eta_T = \eta_0 (a - b/T)^{-T}, \quad (3)$$

где η_T, η_0 — коэффициенты внутреннего трения льда при температуре T и при 0 градусов; a, b — эмпирические константы. Наилучшее совпадение с опытными данными было получено при $\eta_0 = 1,613 \cdot 10^{13}$ г/(см·с), $a = 1,127$ и $b = 0,8596$. Однако эта формула распространения не получила. Вейнбергом на основе экспериментальных данных была изучена зависимость коэффициента внутреннего трения от скорости деформации ϕ' . В результате он получил общую формулу для учета как температуры, так и скорости деформации.

$$\eta = 0,95(1,13 - 0,54/T)^{-T} + 5/\phi', \quad (4)$$

где η выражено в 10^{13} г/(см·с), а ϕ' в 10^{18} 1/с.

При проведении описанной серии испытаний Б.П. Вейнберг впервые выполнил измерения модуля сдвига льда. Описывая эти измерения, он указывает, что «модуль сдвига легко определяется из опыта, если тело вполне упруго; если же тело пластично, то для определения модуля сдвига надо определять *начальную* деформацию тела по приложении силы» [11, с. 271]. Для этого необходимо либо прикладывать силу на очень небольшом промежутке времени, либо проводить измерения деформации практически одновременно с приложением силы. В любом случае на результаты измерения будут заметно влиять инерционные силы.

Предваряя анализ полученных данных, Вейнберг еще раз указывает: «...мои опыты над кручением ледяных стержней, в сущности, отнюдь не приспособлены для определения модуля сдвига, и, если я привожу мои измерения, то, главным образом, по той причине, что мне не встречались определения этой величины» [11, с. 272].

Из-за практической невозможности определения параметров деформации в момент приложения нагрузки измерения выполнялись через небольшие промежутки времени (10–15 с) в течение 1 мин после опускания груза. С той же периодичностью измерения выполнялись и при снятии груза.

Предварительные результаты исследования были опубликованы в работе [12]. Там был сформулирован вывод, что модуль сдвига льда имеет порядок величины 10^9 г/(см·с), и приведено значение этого модуля при температуре -1°C равное $5 \cdot 10^9$ г/(см·с). Последняя величина указывалась во многих руководствах, но с ошибками. Так, Х. Барнес в книгах [2, 3] ошибочно называет эту величину модулем Юнга, а А.Н. Комаровский в работе [6] называет ее модулем упругости, полученным при испытаниях на сжатие.

Более подробный анализ данных о модуле сдвига Вейнберг приводит в работе [11]. По полученным по описанной выше методике экспериментальным данным он строит зависимости изменения модуля сдвига от времени снятия отчетов в течение

первых 2 минут, для случаев установки и снятия груза. Эти графики он экстраполирует в точку $t = 0$, получая, таким образом, значение модуля при «мгновенном» приложении нагрузки. В результате он получает формулу для модуля сдвига N_0 для начального момента действия нагрузки:

$$N_0 = 1,0 \cdot (1 - 0,13T) \cdot 10^{10} \text{ г/(см} \cdot \text{с}^2) \quad (5)$$

В этой формуле учтено влияние температуры, выявленное при анализе экспериментальных данных.

Получение оценки для модуля сдвига льда позволило Вейнбергу применить ко льду реологический закон Шведова, а на его основе оценить величины предела упругости льда на сдвиг и его время релаксации. Так, для нулевой температуры были получены значения предела упругости при сдвиге $5,6 \cdot 10^{-5} \text{ г/(см} \cdot \text{с}^2)$, а для времени релаксации 950 с.

Следующую серию измерений коэффициента внутреннего трения и модуля сдвига Вейнберг провел на леднике Хинтерайс³ в австрийском Тироле зимой 1905/06 г. Популярное описание этих экспериментов содержится в его книге [13]. Научное описание экспериментов содержится в работах [14, 15].

Для проведения экспериментов на леднике Вейнберг модифицировал свой прибор, снабдив его защитным разъемным кожухом, т. к. испытания образцов необходимо было проводить при положительной температуре воздуха, а внутри прибора необходимо было иметь температуру ниже нуля. Было изготовлено два прибора различных размеров. При выполнении исследования применялась та же методика, что и при изучении невского льда.

На альпийском леднике была выполнен большой объем испытаний, который позволил получить достаточно надежные результаты. По результатам обработки были получены следующие выражения для коэффициента внутреннего трения:

$$\eta = \left[0,38(1,32 - 0,65/T)^{-T} + 0,8/\varphi' \right] \cdot 10^{13}, \text{ г/(см} \cdot \text{с)} \quad (6)$$

и модуля сдвига:

$$N_0 = 8 \cdot (1 - 0,65T) \cdot 10^9 \cdot \text{ г/(см} \cdot \text{с}^2) \quad (7)$$

Вейнберг провел сравнение результатов, полученных для невского льда и на леднике. Они сведены в таблицу [15, с. 326]. На ее основании он делает вывод о том, что показатели ледникового льда значительно меньше, чем у речного.

Таблица 2

Сравнение вязких свойств невского и ледникового льда

Table 2

Comparison of viscous properties of the Neva and glacier ice

	$\eta, \text{ г/(см} \cdot \text{с)}$	a	b	$N, \text{ г/(см} \cdot \text{с}^2)$
Невский лед	$0,95 \cdot 10^{13}$	1,13	0,54	$10 \cdot 10^9$
Ледниковый лед	$0,38 \cdot 10^{13}$	1,32	0,65	$8 \cdot 10^9$

Примечание. a, b — коэффициенты в формуле (4).

Note. a, b — coefficients in the formula (4).

³ В книге [13, с. 96] Б.П. Вейнберг называет этот ледник Гинтерейс.

В завершение обзора работ, выполненных Б.П. Вейнбергом, необходимо отметить, что его исследования содержат тщательный анализ возможных погрешностей при выполнении измерений. Так, для оценок модуля сдвига льда указывается погрешность 30–40 %.

Исследования при создании ледовых железнодорожных переправ

Если рассмотренные выше исследования Б.П. Вейнберга носили во многом академический характер, то железнодорожные инженеры, вынужденные создавать и эксплуатировать железнодорожные переправы, пытались изучать упругие, пластические и вязкие свойства льда с сугубо прикладными целями.

Во второй половине XIX в. в России происходит бурное развитие железнодорожного транспорта. Водные артерии становятся существенным препятствием при строительстве железных дорог. Это обстоятельство вызывает развитие мостостроения. Однако возведение мостов через достаточно широкие реки, например Волгу, требует больших финансовых и временных затрат. Поэтому для обеспечения работы железнодорожного транспорта получили развитие различные паромные переправы. Большинство таких переправ функционировало лишь в теплое время года, но некоторые из них трансформировались в ледовые железнодорожные переправы. Появлению таких переправ способствовал вековой опыт населения России по использованию замерзших поверхностей различных акваторий в качестве транспортных путей.

Первые попытки создания железнодорожного пути на ледяном покрове Финского залива относятся к 1853–1856 гг. и 1880 г. [16]. Эти опыты оказались не совсем удачными, но они показали возможность использования ледяного покрова для движения подвижного состава.

Первые ледовые железнодорожные переправы появились на Волге. С 1892 по 1913 г. действовала ледовая переправа около Свияжска (недалеко от Казани). В 1895 г. при постройке заволжских линий Рязанско-Уральской железной дороги была организована узкоколейная ледовая переправа по льду под Саратовом. В 1903 г. была устроена зимняя переправа на Московско-Ярославско-Архангельской железной дороге около Ярославля. Широко известен факт создания в 1904 г. в уникально короткий срок железнодорожной переправы по льду озера Байкал для обеспечения снабжения войск в начале русско-японской войны. Ледовые переправы организовывались при строительстве Великого Сибирского железнодорожного пути и при сооружении Мурманской железной дороги в 1915–1916 гг. Более полная информация о ледовых переправах, их конструкции и способах эксплуатации содержится в работе [17].

При создании ледовых железнодорожных переправ большое внимание уделялось изучению свойств ледяного покрова. Один из исследователей, Б.Н. Сергеев, пишет: «...мы встречаем весьма серьезные затруднения, состоящие в том, что в рассматриваемую конструкцию (ледовая переправа. — К. С.) входит, как основной, элемент, совершенно новый и неизученный с инженерной точки зрения материал, а именно — лед» [18, с. 9].

Наиболее важные работы были выполнены на Саратовской переправе. Еще в 1892 г. при постройке заволжской узкоколейной сети Рязанско-Уральской железной дороги недалеко от Саратова были выполнены исследования грузоподъемности и прогиба под нагрузкой ледяного покрова [19]. При проведении экспериментов на ледяном покрове устанавливался чан, в который наливалась вода. При увеличении

нагрузки возрастал прогиб ледяного покрова, который измерялся нивелиром в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Целью экспериментального исследования было определение нагрузки и прогибов льда, при которых появляется первая трещина, а также указанных величин, при которых трещина становится замкнутой.

Масштабные исследования ледовой переправы под Саратовом были выполнены в 1915–1916 [20], 1921 [18], 1927 [21] и 1928 [22] гг. Во всех этих исследованиях выполнялись измерения прогиба ледяного покрова при прохождении вагонов по переправе. Кроме этого, в 1915–1916 и 1921 гг. проводились исследования механических свойств льда в лаборатории для испытания строительных материалов Рязанско-Уральской железной дороги.

Создателей и эксплуатационников ледовых переправ интересовала величина прогиба ледяного покрова при движении по нему подвижного состава. Большой прогиб льда мог вызвать как разрушение ледяного покрова, так и поломки рельсового пути, что обычно заканчивалось аварийной ситуацией (рис. 3).

Прогиб льда изучался с помощью натурных измерений и в 1916 г. в лабораторных условиях при нагружении балки, установленной на двух опорах. В натурных условиях обычно использовались приборы, применявшиеся для испытаний мостов. Так, в 1916 г. измерения прогиба были сделаны с помощью самопишущего прибора Френкеля. На оси железнодорожного пути вмораживали деревянную раму, на перекладине которой устанавливали прибор над заранее приготовленной прорубью. Груз прибора, соединенный с валиком пишущего механизма, опускали на дно реки. Общая высота конструкции не превышала высоту рельсового пути, что позволяло свободно пропускать вагоны над измерительным устройством [18, 20]. В поперечном направлении прогиб льда измерялся с помощью нивелирования. В результате были получены графики прогибов при прохождении по переправе различных комбинаций вагонов. В лабораторных условиях для нахождения прогиба балки был использован рычаг



Рис. 3. Авария на ледовой переправе через р. Амур.

Фото с сайта <http://rus-biography.ru/DocPage/?IdDocs=1163>

Fig. 3. An accident at a railway crossing across the Amour river/

Photo from the website <http://rus-biography.ru/DocPage/?IdDocs=1163>

с соотношением плеч 1:10. В.П. Катанский так описывает результаты этих опытов: «При нагрузке до 127,5 кг... никакого прогиба заметно не было, при увеличении нагрузки свыше 127,5 кг прогиб стал обнаруживаться и при 235 кг достиг 0,5 мм (абсолютная величина); при 275 кг прогиб был 1 мм и при этом стал раздаваться легкий треск льда, постепенно усиливающийся с увеличением нагрузки, и, наконец, при 303 кг произошел разрыв образца» [20, с. 124].

Необходимо отметить, что в исследованиях 1916 г. целью было изучение именно прогиба льда, а не его модуля упругости. Необходимость в изучении и использовании этого модуля может возникнуть только при наличии у исследователя математической модели изучаемого явления, которая позволяет проводить прогностические или проверочные расчеты. У исследователей в 1916 г. такой модели не было, и они не пытались ее создать.

По-видимому, первую попытку создания математической модели, которая бы описывала работу ледяного покрова в составе ледовой переправы, предпринял инженер Рязанско-Уральской железной дороги Б.Н. Сергеев [18]. Он для этого применил теорию бесконечной балки, лежащей на упругом основании. Для выполнения расчетов ему необходимо было знать значение модуля Юнга ледяного покрова. В своей работе он пишет: «В литературе имеются указания, что модуль упругости льда по определению Тробриджа = $77\,109 \text{ (кг/см}^2 \text{ — К. С.)}$, но по отсутствию данных, к какому льду относится эта величина, воспользоваться им для расчета льда р. Волги вряд ли возможно без повторных наблюдений, хотя бы самых приблизительных» [18, с. 11]. По данным о прогибах льда, полученных Катанским, Сергеев выполнил оценку модуля Юнга льда. Он оказался равным 155100 кг/см^2 при толщине льда 51 см, что в два раза превышало величину, указанную Тробриджем. Для объяснения расхождения Сергеев предлагает три возможные причины:

- неточность данных нивелировки при определении размеров чаши прогиба льда;
- неправильные допущения о характере наблюдаемых деформаций ледяного покрова, которые использовались при выводе расчетных формул (фактически здесь речь идет о том, что деформации льда не являются только упругими);
- значительные колебания численных значений модуля упругости льда при различных гидрометеорологических условиях его образования.

Далее в своей работе Сергеев пишет: «Для выявления, насколько близка к действительности установленная выше на основании целого ряда упрощений и предположений кривая упругой линии, мною в 1921 г. на р. Волге вновь были произведены наблюдения над прогибами льда» [18, с. 21]. В отличие от 1916 г. для измерения прогиба использовалось два прибора, что позволило точнее определить размеры чаши прогиба. Результаты измерений приведены в работе [18]. По полученным результатам также был рассчитан предел упругости льда, который оказался равным 9200 кг/см^2 при толщине льда 75 см. Расхождение расчетных данных Сергеев объясняет теми же, что и ранее, причинами, добавляя к ним еще две. Первая из них заключается в том, что движение состава по переправе — динамический процесс и применение статического подхода при определении модуля Юнга может привести к значительным ошибкам. Второе объяснение связано с возможными неточностями в определении толщины льда. По нашему мнению, возможной причиной получения столь низкого значения модуля Юнга могла быть солнечная радиация. Часть опытов была проведена 10 марта, а к этому времени при наличии солнечной погоды во



Рис. 4. Сергей Александрович Бернштейн (1901–1958).

Фото с сайта <https://urss.ru/cgi-bin/db.pl?page=Avt&list=99207>

Fig. 4. Sergey Aleksandrovich Bernstein (1901–1958).

Photo from the website <https://urss.ru/cgi-bin/db.pl?page=Avt&list=99207>

льду могли начаться процессы внутреннего таяния, которые могут приводить к изменению характера его деформации. В заключительной части своей статьи Сергеев высказывает надежду, что «мы будем в состоянии производить расчет прочности ледяного слоя совершенно так же, как это делается в других областях инженерного дела» [18, с. 30], но для этого необходимо научиться определять модуль Юнга льда в лабораторных условиях и накопить необходимый объем данных.

Следующие исследования прогибов льда на ледовой железнодорожной переправе под Саратовом были выполнены в феврале и марте 1928 г. под руководством инженера С.А. Бернштейна (рис. 4), впоследствии известного специалиста в области строительной механики. Результаты выполненных измерений изложены в работе [21]. Им, так же как и Сергеевым, была разработана математическая модель деформирования ледяного слоя под нагрузкой. В этом случае была использована теория Герца об изгибе бесконечной пластины, лежащей на упругом основании. По измеренным прогибам льда с помощью выведенных им формул Бернштейн выполнил оценку модуля Юнга ледяного покрова. Она оказалась равной при значении коэффициента Пуассона $\mu = 0,4$ — 52600 кг/см², при $\mu = 0,33$ — 55800 кг/см² и при $\mu = 0,25$ — 58700 кг/см². Эти результаты расчета были сопоставлены с данными В.Н. Пинегина [23] и Троубриджа и, по мнению автора, показали удовлетворительное согласование.

Последние измерения на саратовской переправе были выполнены в 1928 г. инженером С.Ф. Некрасовым [22]. Эти измерения интересны тем, что в них впервые была предпринята попытка определения напряжений в ледяном покрове. Для этого были использованы экстензометры Рабю, которые были установлены на уголках, прикрепленных к коротким деревянным брускам. Бруски были вморожены в лед. Для расчета напряжений Некрасов использовал значение модуля упругости, равное 55000 кг/см².

В своих работах и Б.Н. Сергеев, и С.А. Бернштейн обращали внимание на проявление неупругих свойств льда. Сергеев пишет: «Характерно сохранение ледяным покровом после прохода состава медленно исчезающих остающихся прогибов до 3 мм. Это явление показывает, что лед работает не вполне упруго и что на его деформации влияет продолжительность действия нагрузки» [18, с. 26].

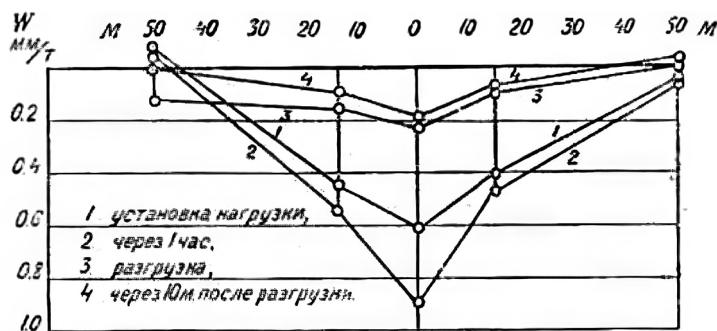


Рис. 5. Изменение величины относительного прогиба во времени $W = w/Q$, Q — вес нагрузки в тоннах [21, с. 48]

Fig. 5. Variation of the relative deflection over time $W = w/Q$, Q — load weight in tons [21, p. 48].

Бернштейном была проведена серия опытов для выяснения влияния продолжительности пребывания нагрузки на ледяном покрове на его прогиб. Опыты проводились при температуре воздуха от -6 до -15 °C. В результате этих экспериментов было установлено, что сразу после установки нагрузки деформации продолжают развиваться во времени в течение примерно 3 часов, при этом прогиб по сравнению с упругим может увеличиться в 2–3 раза, затем их рост останавливается. После снятия нагрузки упругие деформации исчезают, а вязкие остаются (рис. 5), но при этом ледяной покров сохраняет упругие свойства. Резюмируя полученные результаты, Бернштейн делает вывод, что «опасности со временем такая задержка (длительная стоянка вагонов на льду. — К. С.) не представляет, в виду явления *торможения вязких деформаций*, хотя она и способна повредить путь образованием провеса» [21, с. 48].

Другие исследования упругих характеристик льда

Модуль упругости льда можно определить во время испытаний по разрушению изгибом ледяных балок, измеряя их прогиб под нагрузкой. Трудность такого определения заключается в необходимости достаточно точного измерения крайне малой величины прогиба. Тем не менее такие измерения иногда проводились. Например, они были выполнены профессором Н.М. Абрамовым при исследовании физических свойств речного и искусственного льда незадолго до революции в Новочеркасске [24]. В его работе приводится среднее значение модуля упругости льда, полученное при проведении опытов по определению «сопротивления перелому», — 10245 кг/см^2 .

Обширные исследования модуля упругости и коэффициента Пуассона были выполнены профессором В.Н. Пинегиным в 1922–1925 гг. в г. Томске. Для проведения экспериментов использовался лед р. Томи. По результатам выполненных работ было сделано всего две публикации [23, 25], т. к. при переезде Пинегина из Томска в Одессу большинство материалов было потеряно [26]. В первой публикации [25], которая содержит предварительные результаты исследований, при испытаниях образцов на изгиб определялся модуль упругости льда «зеркальным методом», т. е. по деформации образца, которая определялась с помощью установленных на нем зеркал. Пинегин в этой работе приводит только два усредненных значения предела упругости 123000 кг/см^2 при температуре $-4 \div -7$ °R и 21200 кг/см^2 при температуре $-12 \div -15$ °R⁴.

⁴ R — градусы Реомюра. 1 °R = $1,25$ °C.

Уже в Одессе на основании случайно уцелевших материалов исследований по сжатию льда Пинегин подготавливает еще одну работу [23], посвященную изучению модуля упругости и коэффициента Пуассона. Необходимо отметить, что Пинегин был одним из ведущих в мире специалистов по определению коэффициента Пуассона. На эту тему им была защищена докторская диссертация, при подготовке которой им был сконструирован и изготовлен специальный прибор, основанный на использовании «зеркального метода» [27].

Описываемые в работе опыты проводились на открытом воздухе с помощью специально изготовленного рычажного пресса с соотношением плеч рычагов 1:70, что позволяло получать усилия 500 кг при использовании небольших гирь. Измерения продольной деформации проводились прибором Кеннеди, а поперечных — прибором Пинегина. Программа исследований включала изучение трех режимов нагружения льда. Первый режим заключался в ступенчатом нагружении образца. Второй — в нагружении образца до некоторой величины, затем разгрузка и нагружение на большую величину и т. д. Третий режим соответствовал ступенчатому нагружению льда до некоторой величины, затем следовала разгрузка и вновь ступенчатое нагружение до той же величины. Во время испытаний образец льда никогда не доводился до полного разрушения. Эксперименты прекращались при появлении первых трещин.

На основании анализа полученных результатов были сделаны выводы о характере изменения модуля упругости и коэффициента Пуассона льда. Основные выводы сводятся к следующему:

1. Модуль упругости льда при возрастании нагрузки уменьшается, при этом уменьшение происходит интенсивней при малых нагрузках.
2. Модуль упругости льда при чередовании нагрузки и разгрузки заметно увеличивается.
3. Деформации льда состоят из упругих и остаточных, при этом упругие деформации сравнительно слабо выражены.
4. В поперечном направлении упругость проявляется в большей степени, чем в продольном (продольное направление совпадает с направлением железнодорожного пути).
5. При понижении температуры происходит возрастание модуля упругости.
6. Коэффициент Пуассона увеличивается при увеличении нагрузки.

По данным, опубликованным Пинегиним, модуль упругости льда лежит в пределах 3–80 т/см², а коэффициент Пуассона — 0,25–0,5. Данные Пинегина широко использовались, так, А.Н. Комаровский включил их в свою сводку физических свойств льда [5], а А.Н. Цытович и М.И. Сумгин использовали их при изучении свойств мерзлых грунтов [28].

Б.П. Вейнберг подверг критике результаты, полученные Пинегиним. В работе [7, с. 188] он пишет: «Еще менее удовлетворительны опыты Пинегина, в которых в иных случаях вычисленный по *суммарной* деформации модуль Юнга возрастал (в одном опыте — от 49 до 80 т/см²), а в большинстве случаев резко убывал (в лучшем случае в 2½ раза, а в худшем — в 17 раз) с увеличением силы, так что для выяснения упругих свойств льда опыты эти никакого значения не имеют». При анализе данных о коэффициенте Пуассона Вейнберг выбрал из данных Пинегина «только те, которые дают приблизительное постоянство при повышении напряже-

ния» [7, с. 190]. В результате для одной из серий экспериментов он получил значение этого коэффициента, равное 0,326, а из другой $0,358 \pm 0,047$.

В работе [7, с. 511] Вейнберг приводит данные из не опубликованной на начало 1939 г. работы Цытовича, которым, по-видимому для лабораторного льда, были получены следующие значения модуля упругости: при температуре $-1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 31 т/см^2 и при температуре $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 40 т/см^2 . Кроме этого, Вейнберг ссылается на данные Саваренского и Молчанова, которые по результатам измерения скорости сейсмических волн получили значение модуля, равное $7,9\text{ т/см}^2$. К сожалению, указанные работы не удалось обнаружить, что делает невозможным детальное их описание.

Вероятно, первые в СССР исследования коэффициента всестороннего сжатия льда были выполнены в конце 1930-х гг. В.К. Маклашиным в Ярославском педагогическом институте [29]. Величина, которую Маклашин измерял в своих опытах, не является физической характеристикой материала. Коэффициент всестороннего сжатия α задается следующим выражением:

$$\Delta V = \alpha V, \quad (8)$$

где V — объем льда при нормальном давлении; ΔV — величина, на которую уменьшится объем льда при приложении давления P . Очевидно, что $\alpha = f(P)$.

Тем не менее экспериментальные значения коэффициента всестороннего сжатия позволяют определить физическую характеристику материала — коэффициент сжимаемости β (величина, обратная объемному модулю упругости), который задается формулой:

$$\beta = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dP}. \quad (9)$$

Исследования проводились с волжским льдом, вес образцов составлял примерно 400 г. Для определения этого коэффициента им был создан специальный прибор, который состоял из стеклянного цилиндра емкостью 3,7 л и высотой 27 см. При испытаниях цилиндр заполнялся керосином. Этот цилиндр на резиновую прокладку устанавливался на чугунную плиту, в которую были вкручены 4 болта длиной 31 см. Сверху цилиндр накрывался чугунной крышкой с резиновой прокладкой. В крышке были проделаны отверстия для болтов, что позволяло плотно притянуть ее к цилиндру. Кроме этого, в крышке были сделаны отверстия для установки манометра (предел измерения 6 кг/см^2 , точность $0,1\text{ кг/см}^2$) и для ручного насоса для создания давления.

Перед погружением ледяного образца в прибор он снабжался дополнительной плавучестью, в качестве которой использовались лампочки, очищенные от металла и замазки. Кроме этого, в цилиндр помещалась прикрепленная к лампочке тонкая стеклянная пластина с нанесенной на ней резкой тонкой черточкой. По изменению положения этой черточки определялось полное изменение объема собранной системы.

Перед проведением экспериментов по определению коэффициента всестороннего сжатия Маклашин выполнил исследования и определил аналогичный коэффициент для лампочек и керосина.

В результате своих измерений Маклашин получил значения коэффициента всестороннего сжатия от $51 \cdot 10^{-6}$ до $64 \cdot 10^{-6}$. Его результаты использовал Вейнберг в коллективной монографии [7], он приводит обобщенное значение модуля сжатия льда — 90 т/см^2 . В этой монографии Вейнберг часто ссылается на различные результаты измерения физических свойств льда, полученные Маклашиным, указывая на то,

что они были ему сообщены автором. По-видимому, в этих сообщениях фигурировали несколько иные цифры, чем те, которые представлены в работе [29], т. к. их пересчет на модуль объемной упругости дает величины, лежащие в пределах 34–56 т/см².

По мнению автора данной статьи, работа Маклашина содержит большое количество существенных неточностей, которые вызывают некоторое недоверие к полученным результатам. Так, Маклашин совершенно игнорирует зависимость коэффициента всестороннего сжатия от давления, причем это относится не только ко льду, но и к лампочкам и керосину. Можно указать и другие погрешности этой работы.

Заключение

Изучение упругих и вязких свойств льда представляет собой довольно сложную в техническом отношении задачу, которая требует большой изобретательности и настойчивости от исследователя при измерении весьма незначительных деформаций. Такие измерения не могут быть осуществлены для набора информации, в той или иной степени характеризующей ледовую среду, как это происходило, например, при изучении плотности и пористости льда [30]. Эти обстоятельства во многом объясняют малое количество работ, выполненных в России в этом направлении.

Исследования, выполненные в начале XX в. Б.П. Вейнбергом, во многом носили академический характер, определение модуля льда на сдвиг было побочным результатом поставленных им опытов. Использование этих данных для каких-либо практических приложений не предполагалось. Измерения Абрамова также носили побочный характер, т. к. основной целью его исследований была прочность льда при различных деформациях.

Специалисты же, которые занимались созданием и эксплуатацией ледовых железнодорожных переправ, были заинтересованы в практических приложениях. Их интересовал прогиб ледяного покрова под нагрузкой, т. к. его значительная величина могла привести к нарушению целостности железнодорожного полотна. Ими при изучении механических свойств льда переправ предпринимались попытки (неудачные) измерения прогиба исследуемых образцов льда. Поэтому наибольшее внимание уделялось натурным измерениям прогиба при движении нагрузки. Необходимость в определении конкретной величины модуля упругости возникла только при попытке разработки теоретических моделей работы ледовых переправ (Сергеев, Бернштейн). Ими же предприняты попытки восстановления значения модуля упругости по данным измерения прогибов льда.

Вязкостные свойства льда за исключением работ Вейнберга детально не изучались. «Железнодорожники» лишь отмечали наличие остаточных деформаций в ледяном покрове, которые особенно активно развивались при стоянке груза на льду. Факт наличия таких деформаций привел к формулировке требования исключить стоянку подвижного состава на льду.

В советский период изучение упругих и вязких свойств льда практически не проводилось. Исключение составляют обширные исследования Пинегина, к сожалению большей частью утерянные. Мотивация Пинегина не совсем ясна. Можно предположить, что эти исследования выполнялись в рамках какого-либо исследовательского проекта по изучению природы Сибири. При этом изучение прочностных свойств льда являлось изучением некоторого параметра, описывающего природную среду. Исследования же модуля упругости и коэффициента Пуассона льда, скорее всего, носили побочный характер и были обусловлены тем, что Пинегин имел опыт

изучения таких характеристик для других материалов и обладал соответствующим оборудованием.

Подводя итог, можно сделать вывод о неостребованности данных об упругих и вязких свойствах льда в рассматриваемый период времени. Необходимость в таких данных появляется с развитием теоретических представлений об изучаемых объектах, с появлением математических моделей.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Финансирование не осуществлялось.

Competing interests. The author declares that there is no conflict of interest.

Funding. This research had no external funding.

ИСТОЧНИКИ / SOURCES

1. Белл Дж.Ф. *Экспериментальные основы механики деформируемых тел. Ч. I. Малые деформации.* М.: Наука; 1984. 600 с.
2. Barnes H.T. *Ice formation.* New York: John Wiley & sons. London: Chapman & Hall, Limited; 1906. 250 p.
3. Барнес Х. *Ледотехника.* Л.; М.: Государственное энергетическое издательство, 1934. 200 с.
4. *Энциклопедический словарь.* Т. 17. Култагой — Лед / Издатели: Ф. А. Брокгауз, И. А. Ефрон. СПб.: Типо-Литография И.А. Ефрона; 1896. 483 с.
5. Рынин Н.А. *Ледорезы.* СПб.: Типография Ю.Н. Эрлих, Садовая, № 9; 1903. 143 с.
6. Комаровский А.Н. *Структура и физические свойства ледяного покрова пресных вод.* Л.; М.: Государственное энергетическое издательство; 1932. 51 с.
7. Вейнберг Б.П. *Лед. Свойства, возникновение и исчезновение льда.* М.; Л.: Гос. изд. техн.-теор. лит.; 1940. 524 с.
8. Супруненко Ю.П. Гляциология в Русском географическом обществе: к 170-летию РГО. *Лед и снег.* 2015;55(3):133–144. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2015-3-133-140>
Suprunenko Yu.P. Glaciology in the Russian Geographical Society: to the 170th anniversary of the Russian Geographical Society. *Led i sneg = Ice and Snow.* 2015;55(3):133–144. (In Russ.). <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2015-3-133-140>
9. Вейнберг Б.П. О внутреннем трении льда. Гл. 1. Обзор работ по внутреннему трению твердых тел. *Журнал Русского физико-химического общества. Физический отдел.* 1907;38(3):186–224.
Weinberg B.P. About the internal friction of ice. Ch. 1. Review of works on internal friction of solids. *Jurnal Russkogo fiziko-himicheskogo obschestva = Journal of the Russian Physical and Chemical Society.* 1907;38(3):186–224. (In Russ.)
10. Вейнберг Б.П. Некоторые способы определения коэффициента внутреннего трения твердых тел: (предварительное сообщение). *Журнал Русского физико-химического общества. Часть физическая.* Отд. первый. 1904;36(2):47–48.
Weinberg B.P. Some methods for determining the coefficient of internal friction of solids: (preliminary message) *Jurnal Russkogo fiziko-himicheskogo obschestva. Chast fizicheskaya. Otd. pervii. Journal of the Russian Physical and Chemical Society = The physical part. Dept. first.* 1904;36(2):47–48. (In Russ.)
11. Вейнберг Б.П. О внутреннем трении льда. Гл. 2. Непосредственные определения коэффициента внутреннего трения льда. *Журнал Русского физико-химического общества.* 1907;38(4):250–281.

- Weinberg B.P. About the internal friction of ice. Ch. 2. Direct determination of the coefficient of internal friction of ice. *Jurnal Russkogo fiziko-himicheskogo obschestva = Journal of the Russian Physical-Chemical Society*. 1907;38(4):250–281. (In Russ.)
12. Weinberg B. Über die innere Reibung des Eises. *Annalen der Physik*. 1905;18:81–91.
13. Вейнберг Б.П. *Снег, иней, град, лед и ледники*. Одесса: Тип. Банкоиздательства М. Шпенцера; 1909. 127 с.
14. Weinberg B. Über die innere Reibung des Eises II. *Annalen der Physik*. 1907;22:321–332.
15. Вейнберг Б.П. О внутреннем трении льда. Гл. 3. Непосредственные определения коэффициента внутреннего трения ледникового льда. *Журнал Русского физико-химического общества*. 1907;38(5):289–328.
- Weinberg, B.P. About the internal friction of ice. Ch. 3. Direct determination of the coefficient of internal friction of glacial ice. *Jurnal Russkogo fiziko-himicheskogo obschestva = Journal of the Russian Physical and Chemical Society*. 1907;38(5):289–328. (In Russ.)
16. Даниленко П.Н., Дегтев С.Б. Эшелон выходит на лед. Ледовые переправы как способ строительства и восстановления железных дорог. *Материально-техническое обеспечение ВС РФ*. 2023;2:112–117.
- Danilenko P.N., Degtev S.B. The echelon goes onto the ice. Ice crossings as a way to build and restore railways. *Materialno-tehnicheskoe obespechenie VS RF = Material and technical support of the RF Armed Forces*. 2023;2:112–117. (In Russ.)
17. Сазонов К.Е. Из истории ледовых железнодорожных переправ. *Железнодорожный транспорт*. 2024;1:49–54.
- Sazonov K.E. From the history of ice railway crossings. *Jelesnodorijnii transport = Railway transport*. 2024;1:49–54. (In Russ.)
18. Сергеев Б.Н. Устройство зимней переправы вагонов по льду и работа ледяного слоя под действием нагрузки. *Ледяные переправы. 18-й сборник отдела инженерных исследований*. М.: СССР: Транспечать НКПС; 1929. С. 5–35.
19. Фролов А.Н. Опыты над прочностью ледяного покрова р. Волги у Саратова. *Вестник Саратовского отделения Императорского Русского технического общества*. 1903;46:698–701.
- Frolov A.N. Experiments on the strength of the ice cover of the river Volga near Saratov. *Vestnik Saratovskogo Otdeleniya Imperatorskogo Russkogo Tehnicheskogo Obschestva = Bulletin of the Saratov Branch of the Imperial Russian Technical Society*. 1903;46:698–701. (In Russ.)
20. Катанский В.П. Передача товарных вагонов по пути, уложенному по льду р. Волга у Саратова в зиму 1915–1916 годов, и производство наблюдения за влиянием нагрузки на состояние ледяного покрова. *Железнодорожное дело*. 1917;13/14:120–124.
- Katansky V.P. Transfer of freight cars along the track laid on the ice of the river Volga near Saratov in the winter of 1915–1916, and monitoring the influence of load on the state of the ice cover. *Jelesnodorijnnoe delo = Zheleznodorozhnoe delo*. 1917;13/14:120–124. (In Russ.)
21. Бернштейн С.А. Ледяная железнодорожная переправа. *Ледяные переправы. 18-й сборник отдела инженерных исследований*. М.: СССР–Транспечать НКПС; 1929. С. 36–82.
22. Некрасов С.Ф. Опытное обследование работы ледяного пути вагонной переправы через р. Волга у Саратова Саратовской мостоиспытательной станцией. *Ледяные переправы. 18-й сборник отдела инженерных исследований*. М.: СССР–Транспечать НКПС; 1929. С. 83–92.
23. Пинегин В.Н. Об изменении модуля упругости и коэффициента Пуассона у речного льда при сжатии. *Наука и техника*. Одесса. 1927;3–4:1–6.
- Pinegin V.N. On the change in the modulus of elasticity and Poisson's ratio of river ice under compression *Nauka i tehnika = Science and Technology*. 1927;3–4:1–6. (In Russ.)

24. Абрамов Н.М. Механические свойства льда. *Известия Алексеевского Донского политехнического института в Новочеркасске*. 1916;5(1):1–16.
Abramov N.M. Mechanical properties of ice. *Izvestiya Alekseevskogo Donskogo politehnicheskogo instituta v Novocherkasske* = *News of the Alekseevsky Don Polytechnic Institute in Novocherkassk*. 1916;5(1):1–16. (In Russ.)
25. Пинегин В.Н. Предварительное сообщение об исследовании прочности речного льда в связи с температурными изменениями. *Сообщения о научно-технических работах в Республике*. 1924;XII(12–14):1–2.
Pinegin V.N. Preliminary report on a study of river ice strength in relation to temperature changes. *Soobscheniya o nauchno-tehnicheskikh rabotah v Respublike* = *Reports on scientific and technical work in the Republic*. 1924;XII(12–14):1–2. (In Russ.)
26. Тимонов В.Е. *Примечания к русскому переводу*. В кн.: Барнес Х. Ледотехника. Л.; М.: Государственное энергетическое издательство; 1934. С. 180–200.
27. Пинегин В.Н. Опытное исследование коэффициента Пуассона для чугуна. *Известия Томского Технологического института Императора Николая II*. 1908;11(3):1–67.
Pinegin V.N. Experimental study of Poisson's ratio for cast iron. *Izvestiya Tomskogo Tehnologicheskogo instituta Imperatora Nikolaya II* = *News of the Tomsk Technological Institute of Emperor Nicholas II*. 1908;11(3):1–67. (In Russ.)
28. Цытович А.Н., Сумгин М.И. *Основания механики мерзлых грунтов*. М.; Л.: Изд. АН СССР; 1937. 432 с.
29. Маклашин В.К. Коэффициент всестороннего сжатия речного льда. *Метеорология и гидрология*. 1939;10–11:9–15.
Maklashin V.K. The coefficient of all-round compression of river ice. *Meteorologiya i gidrologiya* = *Meteorology and hydrology*. 1939;10–11:9–15. (In Russ.)
30. Сазонов К.Е. Изучение физических свойств льда в России и СССР (конец XIX в. — 1940 г.). Плотность и пористость льда. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2023;69(4):501–518. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-4-501-518>
Sazonov K.E. Study of the physical properties of ice in Russia and the USSR (late 19th century – 1940). Ice density and porosity. *Arctic and Antarctic Research*. 2023;69(4):501–518. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-4-501-518>