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, № 1, 2024

ARCTIC AND ANTARCTIC RESEARCH

Volume 70, No. 1, 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.

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@aari.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)

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.

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

DOI-prefix: 10.30758

The Journal is licenced and indexed by the Supreme Certification Comission in Moscow (VAK).
The Journal publishes papers on the next scientific specialties of the Supreme Certification Comission:
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 № ФС 77-73644 of September 7, 2018.
Registration Certificate for the web publishing ЭЛ № ФС 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)

Содержание

Contents

ОКЕАНОЛОГИЯ
OCEANOLOGY

Оригинальная статья / Original paper
https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-1-6-20
УДК 551.466.3

Пространственная изменчивость трендов значительных высот волн в Карском море

Е.Е. Круглова[1,2]✉, С.А. Мысленков[1], В.С. Платонов[1]

[1] *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

[2] *Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия*

✉*kruglovaee@my.msu.ru*

ЕЕК, 0000-0003-2386-4787; САМ, 0000-0002-7700-4398; ВСП, 0000-0002-7256-1451

Аннотация. В статье проведен пространственный анализ трендов средних, максимальных за год, а также 95-го перцентиля высот значимых волн в Карском море. Анализ трендов выполнен на основе результатов моделирования за период с 1979 по 2021 г. В качестве исходных данных использовались данные о ветре и концентрации льда из реанализов NCEP/CFSR/CFSv2. Оценка трендов высот волн проводилась как для всего периода, так и для безледного. На всей акватории моря величины трендов для среднегодовых значений положительные. Максимальная величина характерна для границы с Баренцевым морем и едва превышает 0,2 м/10 лет. Для безледного периода максимальные величины трендов характерны и для среднегодовых, и для 95-го перцентиля высот волн в северной части моря (максимальные величины трендов ~0,25 м/10 лет и ~0,5 м/10 лет соответственно).

Ключевые слова: ветровые волны, волновая модель WAVEWATCH III, Карское море, моделирование волнения, скорость ветра, тренды

Для цитирования: Круглова Е.Е., Мысленков С.А., Платонов В.С. Пространственная изменчивость трендов значительных высот волн в Карском море. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2024;70(1):6–20. https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-1-6-20

Поступила 03.12.2023 **После переработки 27.02.2024** **Принята 04.03.2024**

Spatial trend analysis of significant wave heights in the Kara Sea

Elizaveta E. Kruglova[1,2]✉, Stanislav A. Myslenkov[1], Vladimir S. Platonov[1]

[1] *Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

[2] *P.P. Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

✉*kruglovaee@my.msu.ru*

EEK, 0000-0003-2386-4787; SAM, 0000-0002-7700-4398; VSP, 0000-0002-7256-1451

Abstract. Over the past decades, the extent of sea ice in the Arctic, including the Kara Sea, has been diminishing. This phenomenon has a direct impact on wind waves as the increased expansion of ice-free water influences wave height. Furthermore, alterations in the ice cover also lead to modifications in atmospheric circulation, necessitating a concurrent analysis of wind and waves to refine the understanding of their interrelationships. In this study, wave modeling data were employed using the WAVEWATCH III model and NCEP/CFSR/CFSv2 reanalyzes. Calculations were performed on a non-structural computational grid. The grid covers the Barents and Kara Seas, as well as the entire northern part of the Atlantic Ocean. The spatial resolution varies from ~ 700 m for the coastal zone of the Kara Sea, to ~ 20 km in the open part of the Kara Sea, covering the period from January 1, 1979 to December 31, 2021. Subsequently, average significant wave heights (SWH), maximum SWH, and the 95th percentile of SWH were computed for each grid node on both monthly and yearly basis. The annual values were analyzed for trends and their significance. Calculations were conducted for both the entire period and ice-free period. Positive trends in annual mean values were observed throughout the sea, with the maximum trend occurring near the boundary with the Barents Sea, barely exceeding 0.2 m/10 years. The northern and northeastern parts of the sea were characterized by significant positive trends of the maximum SWH values. Maximum trend values for the 95th percentile of SWH were also evident in the northern part of the Kara Sea. For the ice-free period, maximum trend values were notable for both the annual mean and the 95th percentile of SWH in the northern part of the sea (maximum trend values are approximately 0.25 m/10 years and 0.5 m/10 years, respectively). Significant positive trends in the annual mean SWH were characteristic of the southern part of the sea, while the largest and significant trends for maximum wave heights were observed in the northeast. The assessment of the contribution of wind and ice regimes to the variability of wind waves remains a subject of discussion.

Keywords: Kara Sea, trends, storm activity, wave modeling, wind speed, WAVEWATCH III, wind waves

For citation: Kruglova E.E., Myslenkov S.A., Platonov V.S. Spatial trend analysis of significant wave heights in the Kara Sea. *Arctic and Antarctic Research*. 2024;70(1):6–20. (In Russ.). https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-1-6-20

Received 03.12.2023 **Revised 27.02.2024** **Accepted 04.03.2024**

Введение

Арктический регион особенно подвержен климатическим изменениям, в числе которых следует отметить уменьшение площади морских льдов [1, 2]. Это приводит к расширению области открытой водной поверхности [2–4]. Подобная тенденция оказывает существенное воздействие на характер ветрового волнения в Арктике, в том числе и в Карском море.

Увеличение высоты волн в Чукотском, Беринговом морях и море Бофорта не может быть объяснено только изменениями в скорости ветра [5]. Существует связь между увеличением площади свободной ото льда водной поверхности и увеличением средней высоты волн в Чукотском море и море Бофорта [6]. С другой стороны, в арктических морях была обнаружена высокая корреляция между усилением экстремальных скоростей ветра и увеличением высоты экстремальных волн [7]. Довольно трудно разделить вклад изменений скорости ветра и площади льда в изменения параметров ветрового волнения из-за существующих механизмов обратной связи этих характеристик. Увеличение площади открытой воды, безусловно, влияет на развитие волнения (увеличивается длина разгона), однако на открытой воде меняется шероховатость подстилающей поверхности и начинается более интенсивный турбулентный обмен теплом, что приводит к изменениям в поле ветра над данной акваторией, что в свою очередь повлияет на ветровое волнение.

Среднее увеличение годового максимума высот значительных волн на основе сценария RCP8.5 в рамках проекта CMIP5 [8] во многих районах Арктики составляет

до 3 см/год относительно условий современного климата (период 1986–2005 гг.). В сентябре процент экстремальных явлений, вызванных циклонами, за последние четыре десятилетия увеличился примерно с 50 % до почти 80 % [9]. По данным реанализа ERA-Interim показано увеличение годовых максимумов значительных высот волн, что в значительной степени коррелирует с увеличением максимальной скорости ветра и в меньшей степени с площадью открытой воды [10].

Существуют различные проблемы, связанные с возможным полным освобождением Арктики ото льда, с точки зрения моделирования (например схемы эйлеровой адвекции, включая ограничения Куранта–Фридрихса–Леви, сингулярность на полюсе и неверное скалярное допущение для векторных компонентов) [11].

Справочные данные по режиму ветра и волнения Карского моря содержат методику расчетов и сведения, в числе которых карты экстремальных и оперативных статистик ветра и волн [12]. На основе моделирования волнения показан рост штормовой активности в Карском море за последние 39 лет, обусловленный в первую очередь увеличением продолжительности безледного периода [13]. Также на основе моделирования проводится сезонная оценка роста количества штормов в Карском море и сделан вывод о наибольшем вкладе периода октябрь–март в межгодовую изменчивость [14]. Средние значения периодов и значительных высот волн остаются стабильными, в то время как экстремальные значения демонстрируют заметные межгодовые колебания [15]. Связь между количеством штормов и крупномасштабными индексами атмосферной циркуляции в Карском море не обнаружена [16].

Однако на данный момент для Карского моря отсутствует подробный анализ трендов высот волн по пространству. Актуальной проблемой является одновременная оценка тенденций в изменчивости скорости ветра, площади морских льдов и характеристик ветрового волнения для более полного понимания взаимосвязи протекающих процессов.

Цель данной работы — провести пространственный анализ трендов среднегодовых, максимальных, а также 95-го перцентиля высот значимых волн в Карском море. Анализ трендов выполнен на основе результатов моделирования за период с 1979 по 2021 г.

Данные и методы

Для анализа ветрового волнения использовалась база данных, полученная на основе модельных расчетов, из работы [17]. При создании базы данных использовалась волновая модель WAVEWATCH III 6.07, схема генерации волн ST6 [18]. Для учета влияния льда была использована схема IC0, в которой при концентрации льда от 0 до 0,5 (концентрация задается в модель в долях от 0 до 1) узел сетки считается покрытым льдом и включается экспоненциальное затухание волновой энергии с поправкой на концентрацию льда в данном узле, при концентрации более 0,5 волновая энергия обнуляется.

При моделировании волнения использовались данные о ветре и концентрации льда с шагом по времени 1 час из реанализа NCEP/CFSR (1979–2010) с пространственным разрешением ~0,3° и реанализа NCEP/CFSv2 (2011–2021) с разрешением ~0,2°. Расчеты проводились с использованием неструктурной сетки, состоящей из 37729 узлов (рис. 1). Сетка охватывает Баренцево и Карское моря, а также всю северную часть Атлантического океана. Пространственное разрешение варьируется от ~700 м для прибрежной зоны Карского моря до ~20 км в открытой части Карского

моря. Спектральное разрешение модели составляет 36 направлений ($\Delta\theta = 10°$), частотный диапазон σ — 36 интервалов от 0,03 до 0,843 Гц [13]. Для более подробного анализа были выбраны 4 точки, расположенные в разных частях моря. Выбор точек обусловлен тем, что максимумы осредненной за весь период высоты волн локализованы на границе между Карским и Баренцевым морями, а также восточнее Карских Ворот (точки 1 и 4). Точка 3 интересна своим расположением в зоне, где наблюдаются максимальные изменения в ледовитости, а также наибольшие величины трендов для максимальной высоты волны (рис. 2*в*). Точка 2 была выбрана из-за расположения в центральной части акватории Карского моря, где влияние Баренцева моря отсутствует, а тенденции изменения ледовитости менее выражены.

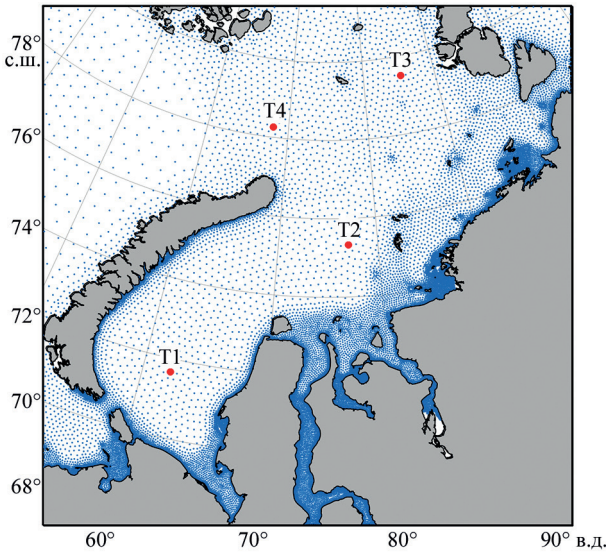

Рис. 1. Узлы неструктурированной вычислительной сетки. T1–T4 — точки, выбранные для подробного анализа данных

Fig. 1. Unstructured computational grid. T1–T4 are the points selected for data analysis.

Оценки качества волновой модели, полученные на основе сравнения с данными прямых измерений и спутников Cryosat, Saral, Sentinel, представлены в [13–17].

Необходимо отметить, что, согласно схеме учета льда в модели, узел с концентрацией льда более 0,5 считается покрытым льдом и высота волны составляет 0 м. В связи с чем для каждого узла сетки вычислялась средняя высота значительных волн (при наличии льда высота волны, равная 0 м, учитывалась при вычислении среднего), максимальная высота значительных волн и 95-й перцентиль. А также вычисления проводились отдельно для безледного периода (когда концентрации льда в узле составляла более 0,5, значение высоты волны, равное 0 м, не учитывалось при вычислении среднего).

Анализ трендов основан на величинах средних, максимальных и 95-го перцентиля значительных высот волн, приведенных к ежегодным данным (длина ряда 43 значения, т. е. годовые значения, с 1979 по 2021 г.). Величина тренда и оценка его значимости получены для каждого узла вычислительной сетки. В качестве тренда использовалась модель линейной регрессии. Оценка значимости проводилась пу-

тем проверки адекватности модели по критерию Фишера и оценки коэффициентов регрессии на значимость по критерию Стьюдента. При вычислении критерия Стьюдента и критерия Фишера использовался уровень значимости 5 %.

Также был проведен подробный анализ трендов в 4 точках, расположенных в разных частях Карского моря (см. рис. 1). Анализ величин трендов в этих точках проведен отдельно по месяцам года. Результаты приведены для января, апреля, июля и октября. Выбор именно этих месяцев обусловлен наиболее контрастирующей изменчивостью режимов волнения.

Данные реанализа NCEP/CFSR/CFSv2 использовались для оценки трендов среднегодовых значений и 95-го перцентиля скорости ветра. Значимость трендов по ветру оценивалась по t-критерию Стьюдента (используемый уровень значимости 5 %).

Результаты

Пространственный анализ распределения величин трендов

На основе среднегодовых значений, максимальных и 95-го перцентиля высот волн были получены карты величин линейных трендов в каждом узле сетки для всего периода (рис. 2) и для безледного периода (рис. 3). Черными точками показаны

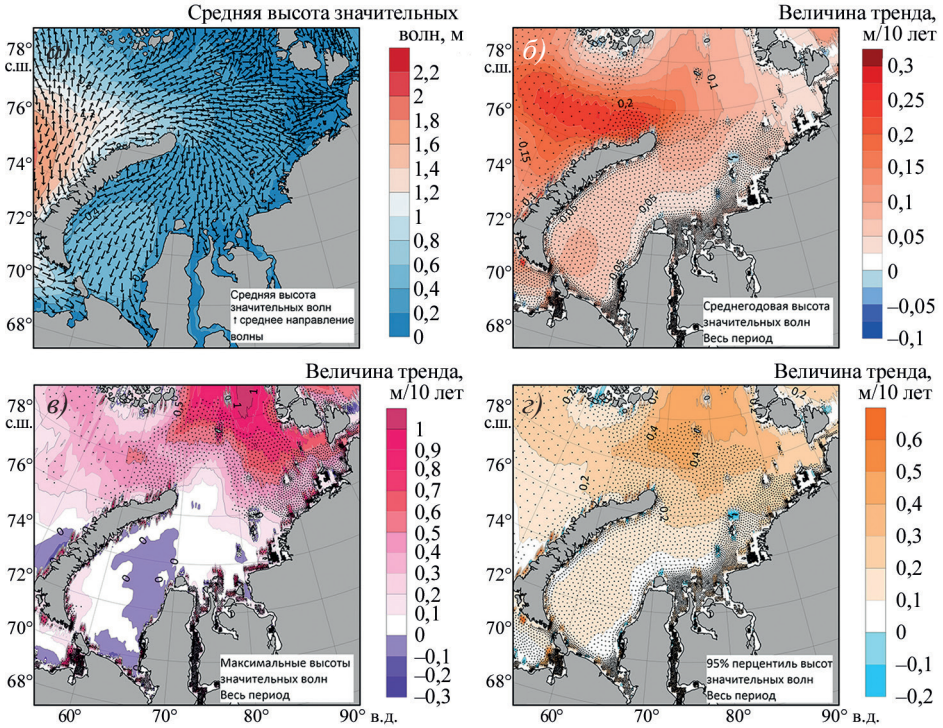

Рис. 2. Карты распределения средней высоты и направления волны (*а*) и величин трендов для среднегодовых (*б*), максимальных (*в*), 95-го перцентиля (*г*) значительных высот волн за весь период. Черными точками показаны узлы сетки, в которых тренды оказались значимы

Fig. 2. Maps of the distribution of the average wave height and direction (*a*), trend values for the annual (*б*), maximum (*в*), and 95th percentile (*г*) of significant wave heights for the entire period are shown. The black dots indicate the grid nodes where significant trends were found

узлы сетки, для которых тренд оказался значим. Максимальная годовая высота волны оценивалась только один раз, так как значения для всего периода и для безледного имеют одни и те же максимумы в значениях.

На рис. 2*а* видно, что максимальные средние высоты волн более ~0,55 м наблюдаются на границе Карского и Баренцева морей, а также в районе Карских Ворот. Стрелочками на рис. 2*а* обозначены средние направления волн (указано направление движения волны). Для более корректной визуализации на карту не наносились направления на расстоянии менее 15 км от берега. На всей акватории моря величины трендов среднегодовых высот волн положительные (см. рис. 2*б*). Максимальная величина наблюдается на границе с Баренцевым морем и составляет до 0,2 м/10 лет. Тренды статистически значимы для всего моря, кроме области севернее 76–78° с. ш. Для максимальной высоты волн характерны большие величины трендов (до 1 м/10 лет) на самом севере и нулевые или слабые отрицательные тренды в центральной части Карского моря. Значимые тренды локализованы в северной и северо-восточной части моря. Максимальные величины трендов для 95-го перцентиля высот волн составляют до 0,4 м/10 лет и расположены в северной части Карского моря (см. рис. 2*г*). Значимые тренды определяются практически повсеместно, кроме области севернее 77–78° с. ш. Так как многолетняя кромка льдов смещается на север [1–4], следовательно, ветровое волнение развивается там, где ранее круглый год был лед, что объясняет тренды для максимальной высоты волн и 95-го перцентиля.

Для среднегодовых значений высот волн в безледный период характерно иное пространственное распределение величин трендов (рис. 3*а*). Видно, что максимальные величины трендов локализованы в северной части моря и достигают 0,2 м/10 лет. Примечательно, что в центральной части Карского моря положительные тренды практически отсутствуют. Так как здесь при анализе не учитываются нулевые высоты волн при наличии льда, то этот показатель можно считать более объективным, чем оценки трендов на рис. 2*б*. Тренды для 95-го перцентиля значимых высот волн

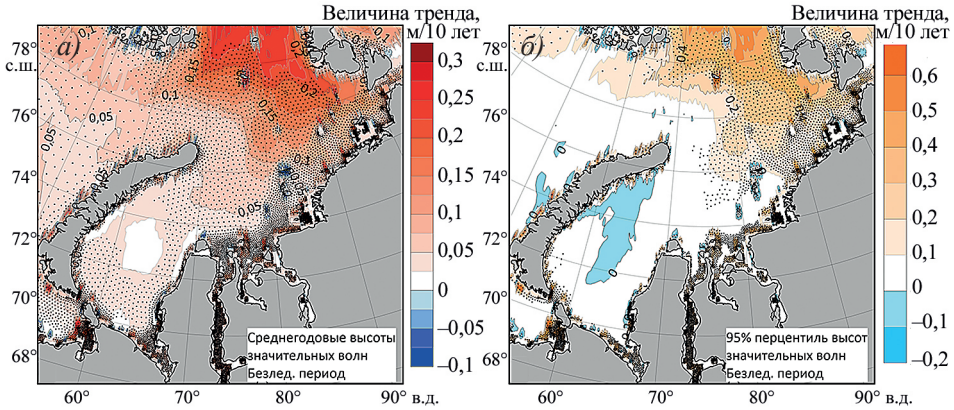

Рис. 3. Карты распределения величин трендов для среднегодовых (*а*) и 95-го перцентиля (*б*) значительных высот волн в безледный период. Черными точками показаны узлы сетки, в которых тренды оказались значимы

Fig. 3. Maps of the distribution of significant wave height trend values for average annual (*a*) and 95th percentile (*б*) significant wave heights during the ice-free period. The black dots indicate grid nodes where significant trends were found

в безледный период нулевые или слабые отрицательные на большей части акватории Карского моря. Положительные значимые тренды для 95-го перцентиля наблюдаются только в северной и северо-восточной части моря (см. рис. 3*б*). Именно в этих областях в 1980–1990-е гг. практически весь год присутствовал морской лед, а в последние годы открытая вода наблюдается все чаще. Таким образом, рост волн за счет увеличения длины разгона при уменьшении площади морского льда в центральной, южной и юго-восточной частях Карского моря практически отсутствует. Эта тенденция наблюдается только на самом севере Карского моря, и связано это скорее с отсутствием открытой воды в некоторые годы и устойчивым (хоть и непродолжительным) безледным периодом с начала 2000-х гг. Более наглядно это показано ниже при анализе результатов в точках.

Как известно, ветровое волнение вызывается прежде всего энергией ветра, а поля морского льда являются только ограничением для распространения ветровых волн. Следовательно, тренды для ветровых волн необходимо анализировать совместно с трендами для скорости ветра.

На рис. 4*а* видно, что положительные тренды для среднегодовой скорости ветра значимы практически для всей акватории моря, а для 95-го перцентиля значимы для западной и северо-западной частей моря. Наибольшие величины трендов как для средней скорости ветра, так и для 95-го перцентиля наблюдаются в Баренцевом море, а также на границе Баренцева и Карского морей.

Следовательно, положительные тренды для средней высоты волн в безледный период как в Баренцевом, так и в Карском море (см. рис. 3*а*) могут быть связаны с увеличением средних скоростей ветра (рис. 4*б*). Тренды для максимальных высот волн (см. рис. 2*в*) и для 95-го перцентиля высот волн в безледный период (см. рис. 3*б*) в Карском море севернее 76° с. ш., по всей видимости, связаны с изменением ледовой обстановки, так как сходства с распределением величин трендов скорости ветра практически не наблюдается.

В центральной части Карского моря тренды для средней скорости ветра и для 95-го перцентиля положительны, продолжительность безледного периода увеличивается, однако роста волн не наблюдается (см. рис. 3).

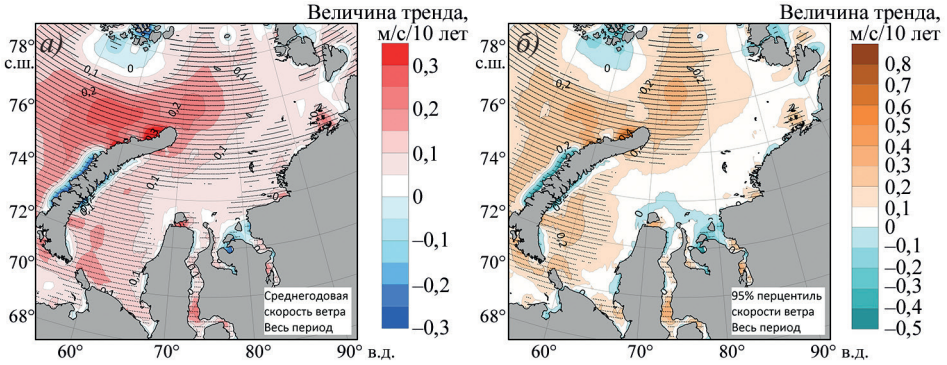

Рис. 4. Карты распределения величин трендов для среднегодовых (*а*) и 95-го перцентиля (*б*) скоростей ветра. Черными точками показаны узлы сетки, в которых тренды оказались значимы

Fig. 4. Maps of distribution of trend values of average annual (*а*), and 95th percentile wind speeds (*б*) The black dots indicate the grid nodes where trends were significant

Полученные тренды для скорости ветра хорошо согласуются с аналогичными результатами в работах [20, 21], где анализ выполнялся на основе других данных по ветру (ERA-Interim, ERA5). Реанализ MERRA2, представленный в [20], имеет другое распределение как знака тренда, так и его значимости для Карского моря. Следует также отметить, что значимых трендов высот волн в Карском море в [20] не найдено, что может объясняться другой конфигурацией волновой модели и другими входными данными по ветру и льду.

Таким образом, влияние сокращения площади льда на тренды ветрового волнения подтверждается только для северной части Карского моря между архипелагами Земля Франца-Иосифа и Северная Земля. Тренды для средней высоты волн в безледный период на границе Карского и Баренцева морей вполне могут объясняться положительными трендами в скорости ветра.

Анализ средней, максимальной и 95-го перцентиля высот волн в точках по годам

На рис. 5*а* показаны высоты средних, максимальных и значительных волн 95-го перцентиля в точке T1 и линии трендов. Для среднегодовых высот волн тренды значимы и для всего периода, и для безледного. Наибольшая величина тренда наблюдается при оценке среднегодовых высот волн за весь период — каждые 10 лет высота волны становится больше на 0,08 м. Также значимым является тренд для 95-го перцентиля (за весь период), его величина 0,1 м/10 лет. Остальные тренды оказались статистически незначимыми. Отрицательный тренд для 95-го перцентиля высот волн в данной точке в безледный период статистически незначим.

Для T2 тренд для максимальных годовых значений тоже оказался незначимым. Величины трендов при оценке всего периода больше, чем для безледного и составляют 0,07 м/10 лет и 0,2 м/10 лет (для среднегодовых и 95-го перцентиля высот волн соответственно).

Интереснее ситуация для T3 (см. рис. 5*б*). Пропуски в значениях характерны для лет, когда в данной точке круглый год был лед. Уже основываясь на этом, можно отметить, что начиная с 2004 г. узел уже никогда не был покрыт льдом в течение всего года. Здесь положительные значимые тренды характерны для оценки в безледный период. Средняя высота волны увеличивается каждые 10 лет на 0,2 м, а перцентиль за тот же период времени возрастает на 0,4 м. Остальные тренды оказались статистически незначимыми. Это является дополнительной иллюстрацией к картам трендов на рис. 3, где максимальные величины трендов расположены в районе T3.

Следовательно, большие значимые величины трендов для высоты волн в безледный период для северо-востока Карского моря (см. рис. 3*б*) можно объяснить не увеличением длины разгона и высоты волн, а просто периодическим отсутствием волн до 2004 г.

Для T4, находящейся на границе между Карским и Баренцевым морями, при оценке за весь период значимые положительны тренды характерны для максимальных годовых значений и высот волн 95-го перцентиля (0,4 м/10 лет и 0,3 м/10 лет). Тренд для среднегодовых волн значим только при оценке за безледный период. Можно предположить, что тренд экстремальных волн в этом районе моря определяется в первую очередь трендами ветра (см. рис. 4).

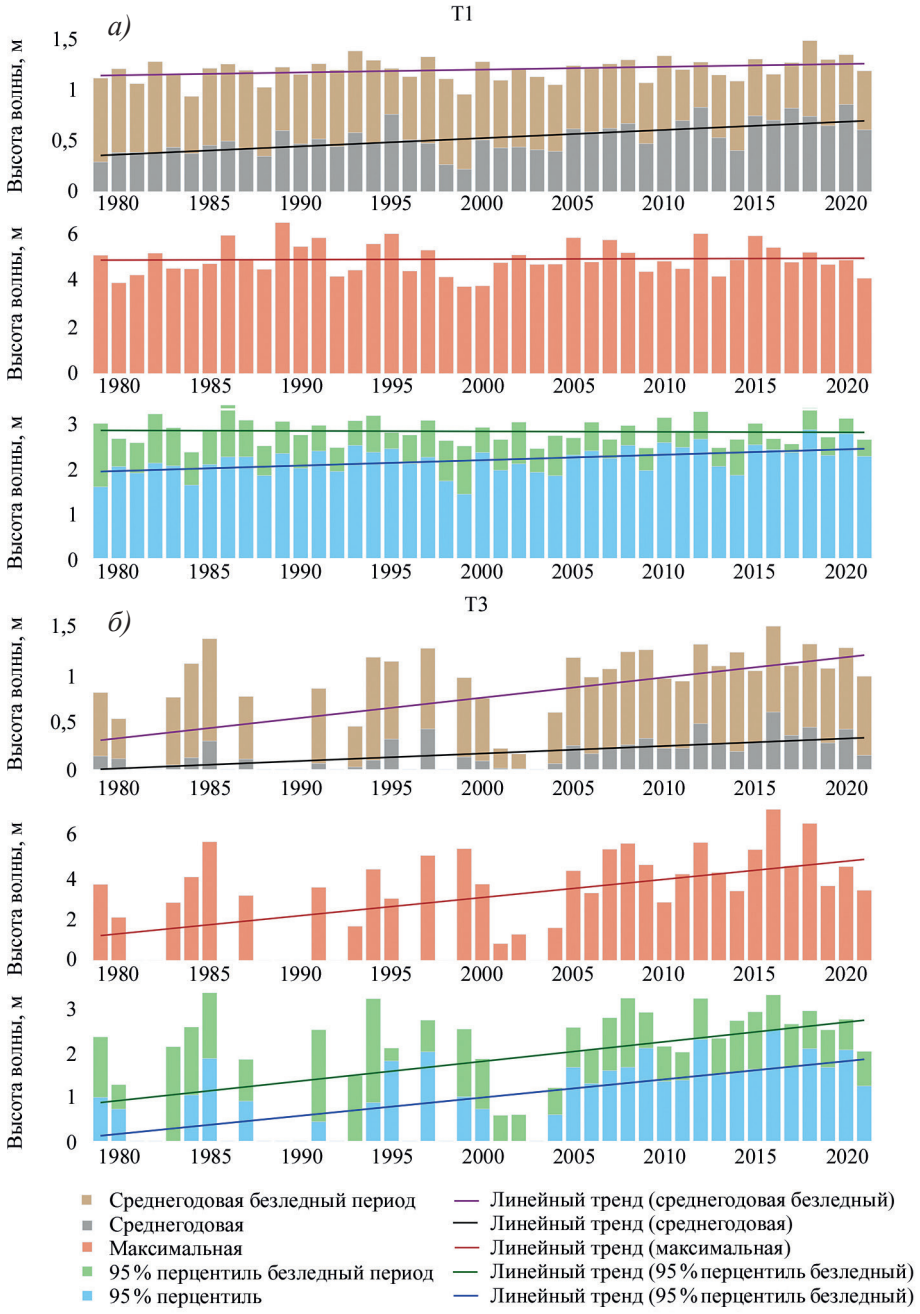

Рис. 5. Многолетний ход среднегодовых, максимальных годовых и 95 % перцентиля высот волн в T1 (*а*) и T3 (*б*)

Fig. 5. Time series of the average annual, maximum annual and 95th percentile of the wave heights at T1 (*а*) and T3 (*б*) points

Анализ средней, максимальной и 95-го перцентиля высот волн в точках по месяцам

Для Т1 характерно, что с января по май большую часть рассматриваемого периода узел покрыт льдом. При анализе средних, максимальных и 95-го перцентиля высот волн в Т1 значимые положительные тренды были найдены для июля (при оценке за весь период) с величинами трендов 0,12 м/10 лет, 0,24 м/10 лет и 0,19 м/10 лет соответственно и для ноября (как за весь период, так и для безледного). Наибольшие величины трендов в ноябре характерны для максимальных высот волн (0,42 м/10 лет) и для 95-го перцентиля в безледный период (0,35 м/10 лет). Отрицательные незначимые тренды были найдены для среднегодовой и 95-го перцентиля (в апреле) и для перцентиля и максимальных значений (в августе–октябре).

В период с декабря по апрель в Т2 наблюдается отсутствие волнения (исключая декабрь 2020 г., когда в точке еще не успел образоваться лед и волнение достигло ~4 м в максимуме). При оценке для всего периода величины трендов оказались больше, чем при оценке за безледный. Положительные значимые тренды найдены в июле, августе и октябре. Максимальная величина тренда средних за весь период 0,29 м/10 лет (октябрь), за безледный 0,12 м/10 лет (июль), максимальных — 0,48м/10 лет (июль). Величины значимых трендов 95-го перцентиля высот волн изменяются от 0,23 до 0,36 м/10 лет в зависимости от периода и месяца. Есть незначимый отрицательный тренд для максимальных значений в сентябре.

В Т3 период, когда узел покрыт льдом, больше в сравнении с другими выбранными узлами (с ноября по май). Однако с 2009 г. наблюдалось 5 лет, когда в ноябре было волнение (с максимумом в ~7 м в 2016 г.). Для периода июнь–сентябрь характерно наличие положительных трендов. Исключения составляют среднее и 95-го перцентиля высот волн для всего периода в июне, когда тренды слабо отрицательны. Положительные значимые тренды характерны для максимальных и 95-го перцентиля за весь период (0,67 и 0,48 м/10 лет) и для средних и 95-го перцентиля за безледный период (0,24 и 0,47 м/10 лет) в сентябре.

Значимые положительные тренды в Т4 характерны для июня, августа и октября. Максимальная величина тренда найдена для максимальных значений в июне — каждые 10 лет высота волн увеличивается на 0,8 м.

На рис. 6 представлены величины трендов в каждый отдельный месяц за весь период для средней высоты волны. Видно, что для Т2 и Т3 характерно отсутствие трендов с января по май–июнь, что связано с ледовым режимом данных областей. На границе же с Баренцевым морем (Т4) тренды во все месяцы положительные, с максимальными в ноябре. В точке в южной части моря (Т1) максимальные величины трендов характерны для декабря, что может быть обусловлено более поздним ледообразованием.

Полученные в ходе сезонного анализа данные в целом согласуются с [21], где показано увеличение экстремальных волн 100-летней повторяемости в разные месяцы, однако величина изменений другая, вследствие разного методического подхода и разного исследуемого периода. Также полученные результаты согласуются с [22–24], где приводятся оценки изменчивости площади морского льда, районы наибольшей изменчивости (например, северо-восточная часть Карского моря) и более поздние периоды ледообразования.

Дискуссионным вопросом является оценка величины вклада изменчивости ветра и льда в тренды ветровых волн, что требует дальнейшей работы с исполь-

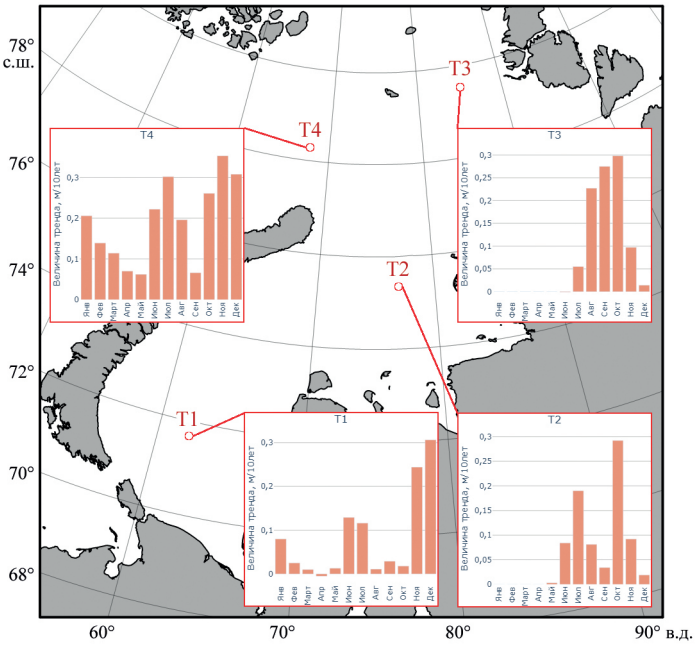

Рис. 6. Величины трендов средней высоты значительных волн по месяцам в точках T1–T4 Карского моря на основе многолетнего анализа

Fig. 6. The values of trends in the average wave height by months at points T1–T4 in the Kara Sea based on a multi-year analysis

зованием различных методических подходов. Сложность данного вопроса заключается в том, что уменьшение площади морских льдов неоднозначно влияет и на циркуляцию атмосферы, в том числе и на приводный ветер [25, 26]. Количественная оценка вклада данных параметров в изменчивость волнового режима является перспективным направлением дальнейшей работы. Также не вполне очевидно, какая скорость и продолжительность ветра вызывает волны определенной высоты, для оценки влияния ветра. Климатические изменения в направлении ветра приводят к изменению разгона и, следовательно, параметров ветрового волнения. Эти вопросы требуют дальнейшей глубокой проработки.

Заключение

В ходе работы был выполнен анализ пространственной изменчивости трендов средних, максимальных и 95-го перцентиля значительных высот волн. Тренды оценивались как для всего периода, так и отдельно для безледного.

На всей акватории моря величины трендов для среднегодовых значений положительные. Максимальная величина характерна для границы с Баренцевым морем и едва превышает 0,2 м/10 лет. Для максимальных волн значимые положительные тренды характерны для северной и северо-восточной частей моря. Максимальные величины трендов для 95-го перцентиля высот волн характерны также для северной части Карского моря.

Для безледного периода максимальные величины трендов характерны и для среднегодовых, и для 95-го перцентиля высот волн в северной части моря (максимальные величины трендов ~0,25 м/10 лет и ~0,5 м/10 лет соответственно).

Значимые положительные тренды для среднегодовых значений высоты волн характерны для южной части моря, в то время как для максимальных высот волн наибольшие и значимые тренды наблюдаются на северо-востоке. Такое распределение связано с тем, что именно северный и северо-восточный районы моря большую часть года покрыты льдом, соответственно, изменения ледового климата здесь отражаются сильнее (в том числе отступление ледовой кромки дальше на север). Для центральной и юго-западной частей характерно отсутствие трендов для среднегодовых значений высот волн в безледный период, что может также свидетельствовать о том, что изменение именно ледового режима является основным фактором, определяющим изменения волнения.

По картам трендов ветра видно, что для большей части акватории характерно увеличение средних скоростей ветра, однако величины трендов (максимальные до 0,3 м/с за 10 лет) не являются существенными и не согласуются с картами трендов максимальных высот волн. Это также говорит нам о том, что вклад трендов скорости ветра в изменение высот волн меньше, чем вклад изменчивости ледяного покрова.

Для точки в юго-западной части Карского моря характерно, что в период январь–май большее количество лет узел покрыт льдом. Значимые положительные тренды были найдены для июля и для ноября. Наибольшие величины трендов в ноябре характерны для максимальных высот волн (0,42 м/10 лет).

В период с декабря по апрель в центральной части Карского моря волнение отсутствует. Положительные значимые тренды найдены в июле, августе и октябре. Максимальная величина тренда средних за весь период высот волн 0,29 м/10 лет (октябрь), а за безледный период — 0,12 м/10 лет (июль).

На севере-востоке Карского моря период, когда узел покрыт льдом, больше в сравнении с другими точками (с ноября по май). Положительные значимые тренды характерны для максимальной и 95-го перцентиля за весь период (0,67 и 0,48 м/10 лет) и для средней и 95-го перцентиля за безледный период (0,24 и 0,47 м/10 лет) в сентябре.

Значимые положительные тренды на границе с Баренцевым морем характеры для июня, августа и октября. Максимальная величина тренда характерна для максимальных значений в июне — каждые 10 лет высота волн увеличивается в среднем на 0,8 м.

Для центральной и северо-восточной частей Карского моря характерно отсутствие трендов с января по май–июнь, что связано с ледовым режимом в данных областях. На границе же с Баренцевым морем тренды во все месяцы положительные, с максимальными в ноябре. На юго-западе Карского моря максимальные величины трендов характерны для декабря, что может объясняться более поздним ледообразованием.

Конфликт интересов. Конфликт интересов отсутствует.

Финансирование. Работа Е.Е. Кругловой подготовлена в рамках выполнения темы FMWE-2024-0016 государственного задания Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН. Работа С.А. Мысленкова и В.С. Платонова выполнена при поддержке Программы развития МГУ, проект № 23-Ш07-33. Расчеты по оценкам трендов скорости ветра выполнены В.С. Платоновым с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Вычислительный комплекс для моделирования климата и радиационного мониторинга».

Competing interests. There is no conflict of interest.
Financing. The work of E.E. Kruglova has been prepared within the theme FMWE-2024-0016 of the State Assignment of the Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences. The work of S.A. Myslenkov and V.S. Platonov was supported by the Moscow State University Development Program, project No. 23-Sh07-33. Calculations based on estimates of wind speed trends were performed by V.S. Platonov using the equipment of the Center for Collective Use "Computing Complex for Climate Modeling and Radiation Monitoring".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Matveeva T.A., Semenov V.A. Regional features of the Arctic Sea ice area changes in 2000–2019 versus 1979–1999 periods. *Atmosphere*. 2022;13(9):1434. https://doi.org/10.3390/atmos13091434
2. Алексеев Г.В., Александров Е.И., Глок Н.И., Иванов Н.Е., Смоляницкий В.М., Харланенкова Н.Е., Юлин А.В. Эволюция площади морского ледового покрова Арктики в условиях современных изменений климата. *Исследование Земли из космоса*. 2015;(2):5–19. https://doi.org/10.7868/S0205961415020025

   Alekseev G.V., Aleksandrov E.I., Glok N.I., Ivanov N.E., Smolyanickij V.M., Harlanenkova N.E., Yulin A.V. Evolution of the Arctic Sea ice cover area in the context of modern climate change. *Issledovanie Zemli iz kosmosa = Exploring the Earth from space*; 2015;(2):5–19. (In Russ.). https://doi.org./10.7868/S0205961415020025
3. Serreze M. C., Stroeve J. Arctic Sea ice trends, variability and implications for seasonal ice forecasting. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2015;373(2045):20140159. https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0159
4. Шалина Е.В. Сокращение ледяного покрова Арктики по данным спутникового пассивного микроволнового зондирования. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2013;10(1):328–336.

   Shalina E.V. Arctic sea ice retreat from satellite passive microwave observations. *Sovremennye problem distantsionnogo zondirovaniya Zemli = Current problems in remote sensing of the Earth from space*. 2013;10(1):328–336. (In Russ.)
5. Wang X.L., Feng Y., Swail V.R., Cox A. Historical changes in the Beaufort–Chukchi–Bering Seas surface winds and waves, 1971–2013. *Journal of Climate*. 2015;28(19):7457–7469. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0190.1
6. Thomson J., Fan Y., Stammerjohn S., Stopa J., Rogers W.E., Girard-Ardhuin F., Ardhuin F., Shen H., Perrie W., Shen H., Ackley S., Babanin A., Liu Q., Guest P., Maksym T., Wadhams P., Fairall C., Persson O., Doble M., Graber H., Lund B., Squire V., Gemmrich J., Lehner S., Holt B., Meylan M., Brozena J., Bidlot J.R. Emerging trends in the sea state of the Beaufort and Chukchi seas. *Ocean Modelling*. 2016;105:1–12. https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2016.02.009
7. Liu Q., Babanin A. V., Zieger S., Young I.R., Guan C. Wind and wave climate in the Arctic Ocean as observed by altimeters. *Journal of Climate*. 2016;29:7957–7975. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0219.1
8. Casas-Prat M., Wang X.L. Sea ice retreat contributes to projected increases in extreme Arctic Ocean surface waves. *Geophysical Research Letters*. 2020;47(15):e2020GL088100. https://doi.org/10.1029/2020GL088100
9. Waseda T., Nose T., Kodaira T., Sasmal K., Webb A. Climatic trends of extreme wave events caused by Arctic cyclones in the western Arctic Ocean. *Polar Science*. 2021;27:100625. https://doi.org/10.1016/j.polar.2020.100625
10. Waseda T., Webb A., Sato K., Inoue J., Kohout A., Penrose B., Penrose S. Correlated increase of high ocean waves and winds in the ice-free waters of the Arctic Ocean. *Scientific reports*. 2018;8(1):4489. https://doi.org/10.1038/s41598-018-22500-9

11. Li J.G. Ocean surface waves in an ice-free Arctic Ocean. *Ocean Dynamics*. 2016;66(8):989–1004. https://doi.org/10.1007/s10236-016-0964-9

12. Лопатухин Л.И., Бухановский А.В., Чернышева Е.С. *Справочные данные по режиму ветра и волнения Японского и Карского морей*. СПб.: Российский Морской регистр судоходства; 2009. 358 с.

13. Myslenkov S., Platonov V., Kislov A., Silvestrova K., Medvedev I. Thirty-Nine-Year wave hindcast, storm activity, and probability analysis of storm waves in the Kara Sea. *Water*. 2021;13(5):648. https://doi.org/10.3390/w13050648

14. Круглова Е.Е., Мысленков С.А. Анализ штормовой активности в Карском море по данным волновой модели WAVE WATCH III. *Гидрометеорология и экология*. 2022;(69):675–690. https://doi.org/10.33933/2713-3001-2022-69-675-690

    Kruglova E.E., Myslenkov S.A. Analysis of storm activity in the Kara Sea according to the wave model WAVE WATCH III. *Gidrometeorologiya i ekologiya = Hydrometeorology and Ecology*. 2022;(69):675–690 (In Russ.). https://doi.org/10.33933/2713-3001-2022-69-675-690

15. Duan C., Dong S., Wang Z. Wave climate analysis in the ice-free waters of Kara Sea. *Regional Studies in Marine Science*. 2019;(30):100719. https://doi.org/10.1016/j.rsma.2019.100719

16. Myslenkov S., Kruglova E., Medvedeva A., Silvestrova K., Arkhipkin V., Akpinar A., Dobrolyubov S. Number of storms in several Russian Seas: trends and connection to large-scale atmospheric indices. *Russ. J. Earth. Sci*. 2023; 23(3):ES3002. https://doi.org/10.2205/2023es000828

17. Мысленков С.А., Платонов В.С., Сильвестрова К.П., Добролюбов С.А. Рост штормовой активности в Карском море с 1979 по 2019 г. по данным моделирования. *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*. 2021;498(2):175–182. https://doi.org/ 10.31857/S2686739721060128

    Myslenkov S.A., Platonov V.S., Silvestrova K.P., Dobrolyubov S.A. The growth of storm activity in the Kara Sea from 1979 to 2019 according to modeling data. *Doklady Rossijskoj akademii nauk. Nauki o Zemle = Reports of the Russian Academy of Sciences*. Earth Sciences. 2021;498(2):175–182. (In Russ.). https://doi.org/10.31857/S2686739721060128

18. Tolman H., Abdolali A., Accensi M., Alves J.-H., Ardhuin F., Babanin A., Barbariol F., Benetazzo A., Bidlot J., Booij N., Boutin G., Bunney C., Campbell T., Chalikov D., Chawla A., Cheng S., Collins C., Filipot J.-F., Flampouris S., Liang Z. *User manual and system documentation of WAVEWATCH III (R) version 6.07.* College Park, MD, USA: Tech.Note; 2019. 465 p.

19. Sharmar V., Markina M. Evaluation of interdecadal trends in sea ice, surface winds and ocean waves in the Arctic in 1980-2019. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2021;21(2):ES2002. https://doi.org/10.2205/2020ES000741

20. Cabral I.S., Young I.R., Toffoli A. Long-term and seasonal variability of wind and wave extremes in the Arctic Ocean. *Frontiers in Marine Science.* 2022;(9):802022. https://doi.org/10.3389/fmars.2022.802022

21. Тимофеева А.Б., Шаратунова М.В., Прохорова У.В. Оценка многолетней изменчивости толщины припая в морях Российской Арктики по данным полярных станций. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2023;69(3):310–330. https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-3-310-330

    Timofeeva A.B., Sharatunova M.V., Prokhorova U.V. Estimation of long-term variability of solder thickness in the seas of the Russian Arctic according to data from polar stations. *Problemy Arktiki i Antarktiki = Arctic and Antarctic Research*. 2023;69(3):310–330. (In Russ.). https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-3-310-330

22. Степина А.А., Подрезова Н.А. Оценка изменчивости площади льда Карского моря. В кн.: Материалы Всероссийской научно-практической конференции *Гидрометеорология и физика атмосферы: современные достижения и тенденции развития,* 21–23 марта 2023. СПб.: РГГМУ. 2023. С. 465–467.

Stepina A.A., Podrezova N.A. Assessment of the variability of the ice area of the Kara Sea. In book: Materials of the All-Russian scientific and Practical conference *Gidrometeorologiya i fizika atmosfery: sovremennye dostizheniya i tendencii razvitiya = Hydrometeorology and Atmospheric Physics: Modern Achievements and Development trends*. 21–23 march 2023. SPb.: RSHU; 2023; P. 465–467. (In Russ.)

23. Федоров В.М., Залиханов А.М., Дегтярев К.С. Особенности межгодовой изменчивости площади морских льдов в Северном полушарии. *Арктика и Антарктика*. 2023;(2):102–114. https://doi.org/10.7256/2453-8922.2023.2.41008

    Fedorov V.M., Zalikhanov A.M., Degtyarev K.S. Features of the interannual variability of the sea ice area in the Northern hemisphere. *Arktika i Antarktika = Arctic and Antarctic*. 2023;(2):102–114. (In Russ.). https://doi.org/10.7256/2453-8922.2023.2.41008

24. Semenov V.A., Latif M. Nonlinear winter atmospheric circulation response to Arctic sea ice concentration anomalies for different periods during 1966–2012. *Environmental Research Letters*. 2015;10(5):054020. https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/5/054020

25. Мохов И.И., Семенов В.А., Хон В.Ч., Погарский Ф.А. Изменения распространения морских льдов в Арктике и связанные с ними климатические эффекты: диагностика и моделирование. *Лед и снег*. 2013;53(2):53–62.

    Mokhov I.I., Semenov V.A., Khon V.Ch., Pogarsky F.A. Changes in the distribution of sea ice in the Arctic and related climatic effects: diagnostics and modeling. *Lyod i sneg = Ice and snow.* 2013;53(2):53–62. (In Russ.)

МЕТЕОРОЛОГИЯ И КЛИМАТОЛОГИЯ
METEOROLOGY AND CLIMATOLOGY

Оригинальная статья / Original paper
https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-1-21-32
УДК 551.583

Региональные особенности повторяемости гололеда на севере европейской территории России на фоне меняющегося климата

Г.В. Суркова[1], А.И. Лаврентьева[1]✉, Е.С. Ткачева[2]

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

[2] *ФГБУ «Гидрометцентр РФ», Москва, Россия*

✉LavrentevaAI@my.msu.ru

ГВС, 0000-0001-6096-0749; АИЛ, 0000-0002-2985-0063; ЕСТ, 0000-0002-5543-5517

Аннотация. Выполнен анализ пространственной неоднородности и временных изменений повторяемости гололеда на севере европейской территории России (ЕТР) в Северо-Западном федеральном округе (СЗФО) в период 1986–2022 гг. Показано, что повторяемость гололедных явлений по территории имеет неоднородное распределение. Обсуждаются возможные причины локальных особенностей распределения изучаемого метеорологического явления на территории СЗФО, в частности, влияние общей циркуляции атмосферы и физико-географических особенностей. Исходными данными послужили результаты инструментальных измерений на метеорологических станциях. Обработка данных производилась статистическими методами. Показано, что в центральной части СЗФО повторяемость явления гололеда больше, чем в западной и восточной части округа. Согласно оценке линейных трендов повторяемость гололеда в последние десятилетия возрастала неравномерно по территории СЗФО. Наиболее заметный рост наблюдается в центральной части СЗФО.

Ключевые слова: гололед, опасное метеорологическое явление, повторяемость явления, север европейской территории России, современный климат

Для цитирования: Суркова Г.В., Лаврентьева А.И., Ткачева Е.С. Региональные особенности повторяемости гололеда на севере европейской территории России на фоне меняющегося климата. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2024;70(1):21–32. https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-1-21-32

Поступила 16.10.2023 **После переработки 25.11.2023** **Принята 21.12.2023**

Regional features of glaze ice events frequency in the north of the European territory of Russia in the current changing climate

Galina V. Surkova[1], Anastasia I. Lavrenteva[1]✉, Elena S. Tkacheva[2]

[1] *Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

[2] *Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia*

✉LavrentevaAI@my.msu.ru

GVS, 0000-0001-6096-0749; AIL, 0000-0002-2985-0063; EST, 0000-0002-5543-5517

Abstract. Recently, the interest in society in observing and forecasting dangerous meteorological phenomena in the cold period of the year has noticeably grown. In this work, we study the phenomenon of glaze ice in the north of the European territory of Russia in the North-Western Federal District. Here glaze ice (icing) is less frequent than other forms of ice accretion, but its characteristics most often exceed the criteria of dangerous meteorological phenomena. It is a great danger for various areas of the economy, ship navigation, causing an increase in traumatism of the population and damage to infrastructure. In accordance with the aim of the work, the spatial and temporal variability of the frequency of glaze ice accretion on the territory of the North-Western Federal District in the period 1986–2022 is investigated. The results are obtained on the basis of instrumental observations of meteorological stations. Using statistical analysis, the features of mean yearly frequency at each meteorological station were studied. To assess the direction of annual changes in the glaze ice frequency, the linear trend coefficient was calculated for each meteorological station. The least squares method was used for this purpose. It is shown that the maximum number of days with glaze ice occurs in the central part of the North-Western Federal District. This can be attributed to the more frequent movement of Atlantic and southern cyclones to high latitudes and their precipitation, especially at the atmospheric fronts and in the warm sectors of the cyclones, at air temperatures near zero and below. What makes the spatial distribution of glaze ice frequency even more uneven is the presence of uplands in the European territory of Russia. More precipitation falls on their windward slopes, and the temperature decreases with altitude. The findings show that in recent decades there has been an increase in the frequency of the glaze ice phenomenon in the region. At the same time, the interannual variability remains relatively constant. Taking into account the positive trend in the number of glaze ice events and increasing air temperature and precipitation, it is necessary to develop measures to deal with this hazardous phenomenon and minimize damage from it.

Keywords: current climate, frequency of occurence, glaze ice, hazardous meteorological phenomenon, North of European Russia

For citation: Surkova G.V., Lavrenteva A.I., Tkacheva E.S. Regional features of glaze ice events frequency in the north of the European territory of Russia in the current changing climate. *Arctic and Antarctic Research*. 2024;70(1):21–32. (In Russ.). https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-1-21-32

Received 16.10.2023 **Revised 25.11.2023** **Accepted 21.12.2023**

Введение

Гололед — это слой плотного (матового или прозрачного) льда, образующийся на поверхности земли и на предметах преимущественно с наветренной стороны от намерзания капель переохлажденного дождя или мороси, а также при соприкосновении капель осадков с предметами, температура поверхности которых равна или ниже 0 °С. Чаще всего наблюдается при температуре воздуха от +3 до –10 °С [1, 2]. Гололед — один из самых опасных видов обледенения, он наносит серьезный ущерб топливно-энергетическому комплексу, транспортной сети, сельскому хозяйству, лесной промышленности, экономической сфере, повышает нагрузку на службы комму-

нального хозяйства, увеличивает травмоопасность [3–5]. Гололед относится к одному из видов обледенения, представляющему высокий уровень риска для морских и воздушных судов. Согласно критериям Росгидромета и региональным уточнениям ФГБУ «Северное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» на севере европейской территории России (ЕТР) гололед считается опасным гидрометеорологическим явлением, если диаметр голедно-изморозевых отложений (ГИО) на проводах гололедного станка превышает 20 мм (приказ ФГБУ «Северное УГМС», 10.05.2023 № 672).

Статистика исследования опасных метеорологических явлений (ОЯ) показывает, что издержки на прогнозирование и обеспечение населения качественной информацией о возможном ОЯ в 15 раз уступают расходам на устранение последствий этого же явления [4]. Из этого следует, что планирование деятельности с точки зрения промышленности и экономики требует прогнозирования опасного явления и оценки возможного ущерба, нанесенного этим явлением [5]. Гололед способен нанести огромный вред для жизнедеятельности населения, причем сопровождаться может большими материальными затратами на ликвидацию и устранение последствий его образования. Согласно данным И.И. Леонова[1], в Северо-Западном федеральном округе (СЗФО) гололед, наряду с кристаллической изморозью, особенно часто переходит в разряд высокоинтенсивных отложений, достигших критериев опасного явления.

В настоящей работе представлены результаты анализа современных данных о пространственном распределении гололеда на севере ЕТР (в СЗФО) и тенденциях изменения его повторяемости на фоне современных изменений климата в период 1986–2022 гг. Анализ проведен по данным измерений на метеорологических станциях сети Росгидромета РФ.

Ежегодные оценки повторяемости и других характеристик гололеда представлены в ежегодных докладах об особенностях климата на территории РФ [6]. Результаты, включенные в эти доклады, даны для всей территории РФ, а также в среднем для квазиоднородных климатических районов, выделенных согласно генетической классификации Б.П. Алисова [7]. Материалы докладов включают итоги обобщения за истекший год, а также многолетние тенденции повторяемости гололеда и других ГИО, представляющие крупномасштабную картину пространственного распределения по всей территории РФ. Наша работа посвящена более подробному региональному анализу повторяемости случаев гололеда и тенденций ее изменения на фоне меняющегося климата в пределах СЗФО за период 1986–2022 гг. и обсуждение возможных связей пространственной неоднородности повторяемости с физико-географическими особенностями данной территории и особенностями крупномасштабной атмосферной циркуляции.

В работах отечественных авторов в последние годы большое внимание уделяется опасным метеорологическим явлениям, в том числе связанным с ГИО. Материал публикаций последних лет, посвященных гололедно-изморозевым отложениям, охватывает, как правило, всю территорию России, например [6, 8–10]. Для ЕТР в них отмечается разнонаправленность тенденций без привязки к региональным особенностям рельефа и циркуляции атмосферы и без подробного обсуждения воз-

[1] *Леонов И.И.* Структура атмосферы при формировании высокоинтенсивных гололедно-изморозевых отложений: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 2023. 26 с.

можных причин. В работах [9, 11] гололед рассматривается для календарных осени, зимы и весны без учета летних месяцев, в то время как годовой ход повторяемости гололеда в северо-восточных прибрежных регионах (например, по данным станции Амдерма) имеет максимум в летние месяцы, что отражено далее в данной статье.

Наша работа дополняет выводы предшествующих авторов с акцентом на региональные особенности гололедных отложений в СЗФО.

Актуальность выбора региона обусловлена тем, что он достаточно густо заселен, в нем располагаются промышленные предприятия, развиты сеть транспорта и энергетика. Климатические условия способствуют образованию гололеда в разные сезоны. Таким образом, оценка влияния гололеда на экономику и хозяйство, на условия жизни людей и состояние природной среды востребована в различных сферах человеческой деятельности СЗФО, в том числе на фоне происходящих изменений климата. Это может способствовать минимизации ущерба от гололеда и оптимизации дальнейшего развития различных отраслей человеческой деятельности с учетом локальных особенностей.

Цель данной работы — анализ региональных особенностей сезонных изменений повторяемости явления гололеда и ее многолетние тренды на фоне изменения современного климата на севере европейской территории России (Северо-Западный федеральный округ).

Материалы и методы исследований

Анализ проводился для Северо-Западного федерального округа для периода с 1986 по 2022 г. Изучаемый регион расположен в двух климатических поясах [7]: субарктический (атлантическая область), умеренный (атлантико-арктическая область, а также северная часть атлантико-континентальной европейской области). С точки зрения крупномасштабной атмосферной циркуляции здесь преобладает западный и юго-западный перенос, особенно в холодный период. Выход циклонов нередко сопровождается усилением меридиональных процессов и адвекцией воздушных масс из северных или южных широт (волны холода, волны тепла). Наибольшее количество осадков выпадает на атмосферных фронтах и в теплом секторе циклона. Протяженность СЗФО с запада на восток (без учета Калининградской области) составляет более 35 градусов долготы, приводя к постепенному усилению континентальности климата по мере продвижения в глубь материка и уменьшению влагосодержания воздушных масс. Положение северных и южных районов СЗФО различается более чем на 10 градусов широты, что приводит к существенным различиям радиационного баланса и термического режима в северной и южной частях региона. Зимой отепляющее влияние атлантического воздуха приводит к тому, что уменьшение температуры происходит с запада на восток. Летом изотермы располагаются квазиширотно, температура растет с севера на юг. Дополняет эти факторы формирования климата территории наличие крупных водоемов суши и степень удаленности от Атлантического и Северного Ледовитого океанов, что влияет на абсолютное и относительное влагосодержание воздуха. Еще более усложняет пространственные климатические особенности наличие неоднородного рельефа. Долины многих, особенно крупных рек вытянуты в субмеридиональном направлении с юга на север, в этом же направлении постепенно понижается рельеф в целом. На локальные черты климата в разных районах СЗФО влияет наличие возвышенностей со средними высотами 150–300 м, многие из которых также вытянуты с юга на север на пространстве

междуречий. С учетом преобладающих направлений общего переноса воздушных масс, на обращенных к западу и юго-западу склонах возвышенностей количество осадков больше, чем на восточных. Кроме того, перетекание воздушных масс даже над такими небольшими поднятиями способствует изменению температуры и влажности воздуха и увеличению пестроты их пространственного распределения.

В работе использованы данные наблюдений на 57 метеорологических станциях Росгидромета на территории СЗФО за период с 1986 по 2022 г. (Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015620081), которые перед размещением в общем архиве данных проходят предварительный контроль качества [12]. Была сделана выборка данных наблюдений за атмосферными явлениями, в частности за гололедом (шифр 12 «Гололед» в массиве данных об атмосферных явлениях) и явлениями, благоприятствующими формированию гололеда согласно шифрам: 24 — морось или дождь с образованием гололеда; 56 — морось слабая, образующая гололед; 57 — морось умеренная и сильная, образующая гололед; 66 — дождь слабый, образующий гололед; 67 — дождь умеренный или сильный, образующий гололед[2,3]. Периодичность наблюдений составляет 3 часа. На сервере Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации — Мирового центра данных (ВНИИГМИ-МЦД) доступ к массиву данных, выборка данных по интересующим пользователя станциям, их просмотр и копирование обеспечиваются специализированной технологией Аисори[4].

Расчет средних многолетних значений выполнялся для последних 37 лет, когда ряды наблюдений по всем станциям имеют одинаковую продолжительность. Расположение станций показано на рис. 1. Выбранные станции распределены по территории относительно равномерно с незначительным сгущением плотности расположения в западных субъектах СЗФО (Калининградская, Ленинградская, Псковская области и Республика Карелия). Метеорологические станции, расположенные на островах Баренцева и Белого морей, не включены в рассмотрение. Островной микроклимат в значительной мере отличается от континентального, поэтому требует дополнительного анализа для определения метеорологических условий, благоприятных для формирования гололедных отложений.

Для характеристики тенденции изменения повторяемости случаев гололеда за год использованы коэффициенты линейного тренда, рассчитанные по данным каждой метеорологической станции за период 1986–2022 гг., когда фиксировалось явление гололеда. Коэффициент линейного тренда был получен с помощью метода наименьших квадратов. Значимость оценивалась с помощью критерия Стьюдента. Коэффициенты линейного тренда рассматривались для тех случаев, где коэффициенты статистически значимы на 5%-ном уровне. Общий тренд повторяемости дней с гололедом для всей территории СЗФО был рассчитан по средним значениям всех станций округа.

---

[2] *Булыгина О.Н., Веселов В.М., Разуваев В.Н., Александрова Т.М.* Описание массива срочных данных об основных метеорологических параметрах на станциях России. URL: http://meteo.ru/data/163-basic-parameters#описание-массива-данных (дата обращения: 15.11.2023).

[3] *Булыгина О.Н., Веселов В.М., Александрова Т.М., Коршунова Н.Н.* Описание массива данных по атмосферным явлениям на метеорологических станциях России. Обнинск. ВНИИГМИ-МЦД. URL: http://meteo.ru/data/345-atmosfernye-yavleniya-sroki#http://meteo.ru/data/163-basic-parameters#описание-массива-данных (дата обращения: 15.11.2023).

[4] Технологии Аисори. URL: http://meteo.ru/it/178-aisori (дата обращения: 15.11.2023).

Рис. 1. Расположение станций, данные которых были использованы для анализа распространения гололеда за период 1986–2022 гг.

Fig. 1. Stations whose data were used to study glaze ice over the period 1986–2022

Результаты исследования и обсуждение

С точки зрения формирования гололеда регион СЗФО интересен тем, что сезонный ход температуры, количества атмосферных осадков и влажности воздуха очень различен по территории. Это определяется большой протяженностью округа с севера на юг и с запада на восток и разнообразным рельефом.

Для каждой исследуемой станции был рассчитан средний многолетний сезонный ход повторяемости гололеда по месяцам. Примеры, отражающие эти изменения, представлены на рис. 2 для ряда типичных станций в различных районах СЗФО. При анализе особенностей годового хода гололедных явлений они дополнительно сопоставлялись со средними многолетними месячными значениям температуры и суммы осадков для каждой станции, чтобы сравнить месяцы перехода температуры через 0 °С и годовой ход осадков. Результаты показали, что при переходе средней месячной температуры воздуха через 0 °С весной и осенью частота формирования гололеда определяется количеством осадков и числом дней с осадками, а также влажностью воздуха. Увеличение скорости ветра также способствует образованию гололеда.

Отметим, что в целом для большей части станций отмечается летний минимум повторяемости явлений гололеда или же полное отсутствие явления в теплый сезон, что естественно при положительной летней температуре, особенно в южных районах. Наибольшая повторяемость гололеда происходит в зимний и переходные сезоны. Особенно часто это может происходить при адвекции южных воздушных масс в теплых секторах циклонов. В прибрежных регионах Баренцева моря значительное влияние оказывают теплые течения. При переходе в район влияния Карского

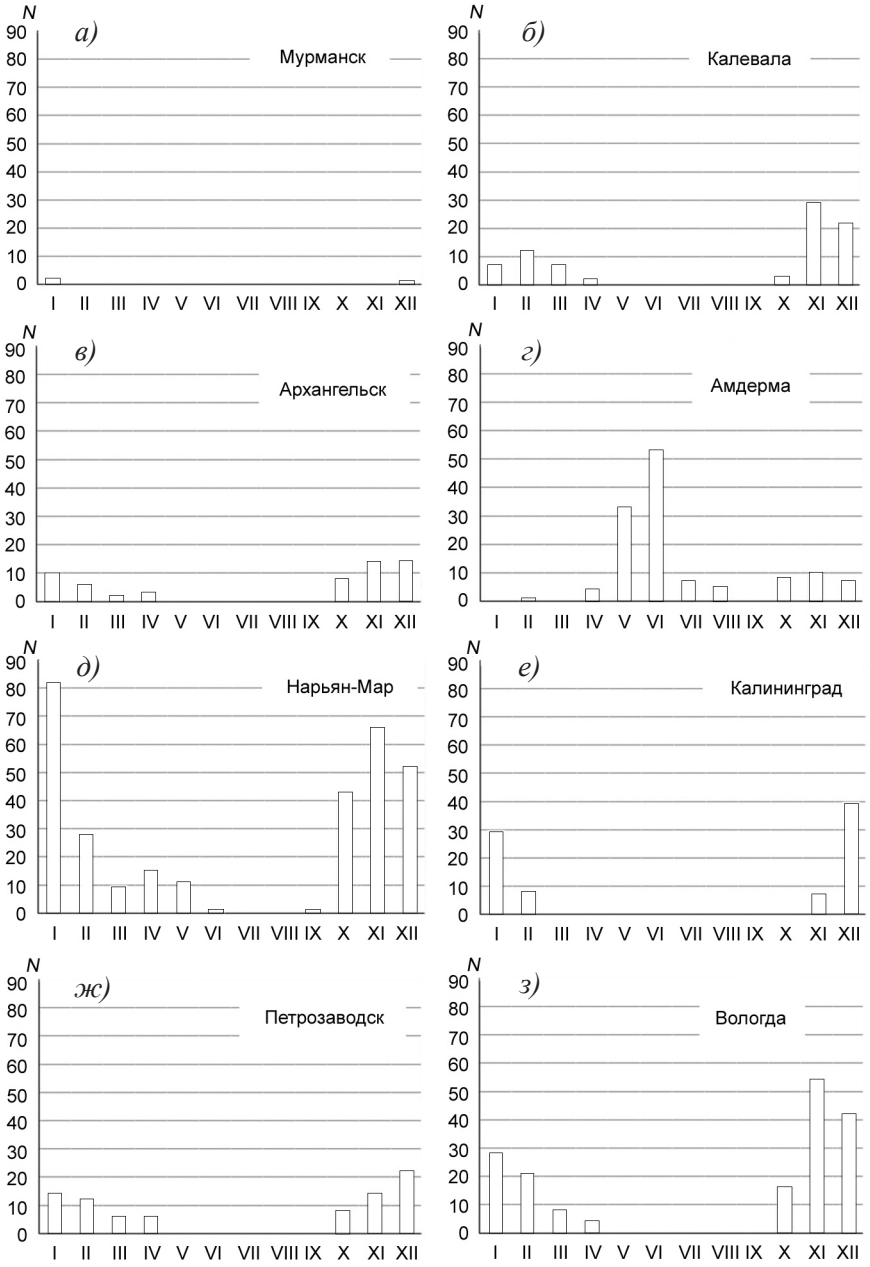

Рис. 2. Повторяемость метеорологических явлений, приводящих к образованию гололеда.

По оси ординат представлено общее количество метеорологических явлений в срочные часы наблюдений, приводящих к образованию гололедных отложений, за период 1986–2022 гг.

Fig. 2. Recurrence of meteorological phenomena leading to the formation of ice.

The ordinate axis represents the total number of meteorological phenomena in urgent observation hours leading to the formation of ice deposits, for the period 1986–2022

моря быстро нарастает континентальность климата с очень холодной продолжительной зимой и коротким холодным летом. Этому способствует также охлаждающее влияние морских льдов, которые в зимнее время занимают практически всю акваторию Карского моря. В качестве примера приведены результаты по ст. Амдерма (рис. 2*г*), кардинально отличающейся по сезонному ходу повторяемости гололеда. Здесь наибольшее число метеорологических явлений, приводящих к образованию гололеда, в среднем отмечается в летний период с максимумом в июне, когда температура воздуха переходит через 0 °С, но часты возвраты холодов. Лето короткое и холодное, но сочетание температуры и осадков при летних похолоданиях может быть благоприятно для формирования гололеда. Яркие примеры таких летних условий отмечались в 1972 и 1987 гг., когда в июне среднемесячная температура воздуха была отрицательной (до –4 °С и ниже), в то время как средняя температура июля в Амдерме 8,0 °С, средний минимум средней месячной температуры июля 4,7 °С, абсолютный минимум –4,4° (1972 г.). Зима суровая, теплые вторжения в это время редки, поэтому вероятность выпадения осадков в жидком виде маловероятна. Зимние атлантические циклоны в этот район приходят реже, осадков выпадает примерно в два раза меньше, чем в летний период.

На большинстве остальных станций максимум повторяемости гололеда приходится на холодный период и переходные сезоны, различаясь лишь абсолютными значениями с учетом количества осадков и влагосодержания воздуха. С учетом температурного режима, продолжительности теплого и переходного сезонов период без гололеда составляет в основном от 3 до 5 месяцев. В западной части региона и для значительной части прибрежных станций, где климат более мягкий, в переходные сезоны года земная поверхность не переохлаждена до такой степени, чтобы выпадающие осадки в жидком виде быстро охлаждались и приводили к гололедным отложениям. Там меньше общее количество случаев гололеда за год.

Из данных наблюдений следует, что для запада и центра территории СЗФО характерно общее увеличение повторяемости гололеда с запада на восток (рис. 3*а*), что связано с увеличением континентальности климата и понижением температуры при достаточном количестве осадков и влажности воздуха. Далее, с увеличением континентальности в восточной части региона количество осадков и влажность воздуха уменьшаются, поэтому повторяемость гололеда снижается. Таким образом, наибольшие значения в среднем наблюдаются в центральной части СЗФО в зоне 40–50° в. д. Исключения составляют отдельные станции, где местные условия и расположение станций способствуют увеличению числа случаев с гололедом. Такими факторами могут быть возвышенности на ЕТР, где на наветренных склонах выпадает больше осадков, а выхолаживание при подъеме создает благоприятный для образования гололеда фон.

Еще одним существенным фактором является выход атлантических и южных циклонов, которые постепенно смещаются на север. Таким образом, северные территории ЕТР оказываются под влиянием атмосферных фронтов и теплых секторов циклонов, где достаточное количество осадков и адвекция в северные широты относительно теплого воздуха создают благоприятные условия для образования гололеда. Особенно ярко это проявляется в холодный период.

На рис. 3*б* показаны коэффициенты линейного тренда числа дней с гололедом за исследуемый период для каждой станции. Отрицательные значения коэффициента невелики. Наиболее заметна тенденция увеличения повторяемости в центральной части

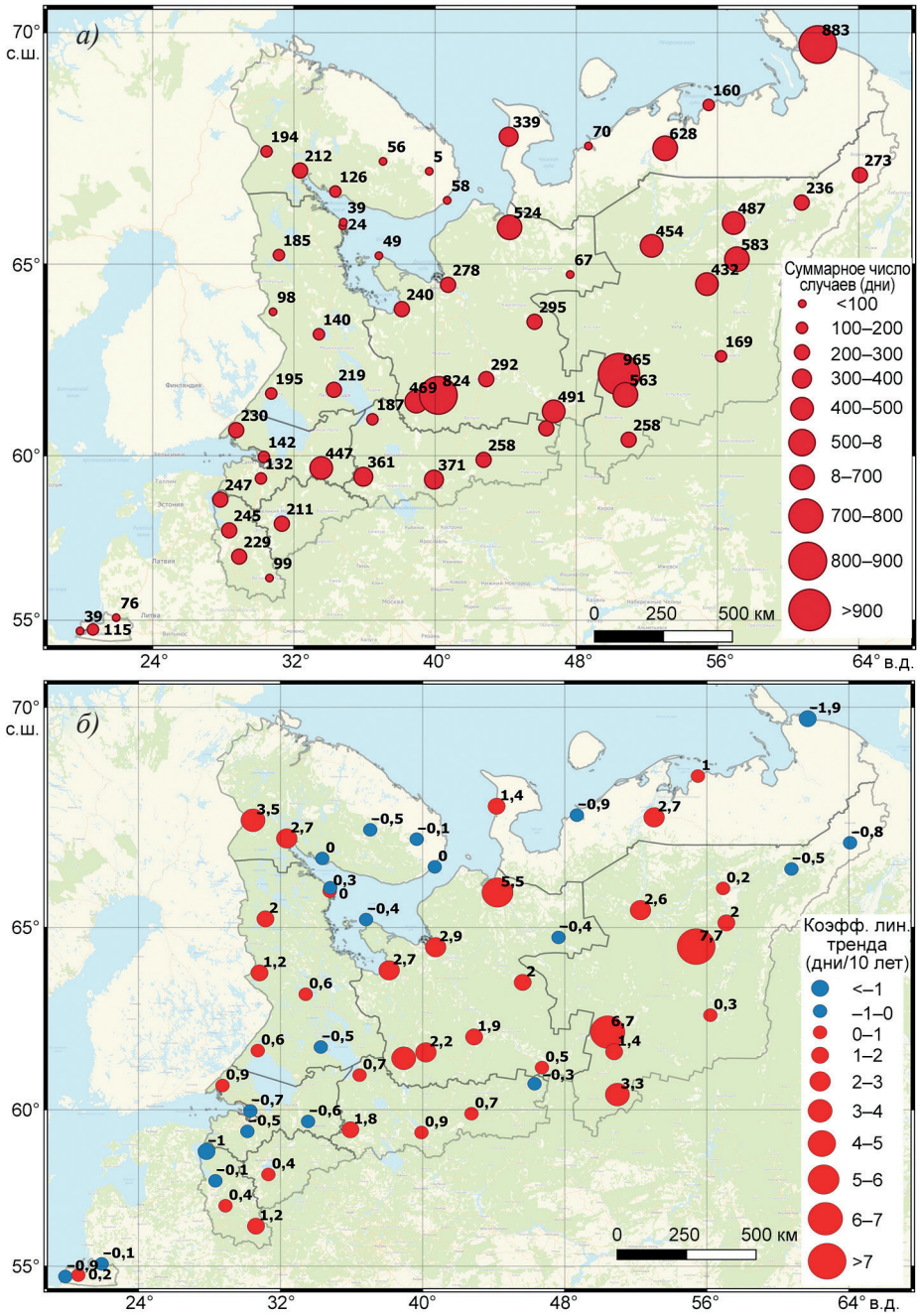

Рис. 3. Общее число срочных наблюдений (1986–2022гг.), во время которых на метеорологических станциях наблюдались гололедные отложения, на территории СЗФО

Fig. 3. Total number of urgent observations (1986–2022), in the course of which ice deposits were observed at the meteorological stations, in the territory of the Northwestern Federal District

СЗФО. Это может быть связано с циркуляционным фактором, в частности с ростом повторяемости выхода циклонов умеренных широт на север и влиянем их теплых секторов и осадков атмосферных фронтов на фоне слабоотрицательной температуры, способствующих увеличению числа случаев гололеда. С прохождением циклонов также связано усиление ветра, способствующего еще более активному нарастанию гололеда.

Рост температуры и количества осадков в СЗФО отмечается и в Третьем оценочном докладе об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации [13]. Это согласуется с общей тенденцией роста повторяемости гололеда, полученной в данной работе (рис. 3*б*).

Таким образом, совместное влияние циркуляционного и физико-географического факторов на фоне потепления и увеличения количества осадков формирует неоднородную в пространстве картину повторяемости гололеда в СЗФО.

В течение года изменение повторяемости гололедных отложений в разные сезоны может проявляться по-разному, необходимо анализировать каждый месяц отдельно. Как показали наши расчеты, в период с февраля по март наблюдается наибольшая скорость увеличения повторяемости гололедных отложений. Распределение максимальных значений тренда повторяемости случаев для исследуемой территории за февраль в наибольшей степени совпадает с годовым трендом. Можно предположить, что именно изменение метеорологических условий в феврале вносит весомый вклад в изменение общего числа случаев с гололедом в течение года.

Получено, что в июне для большей части исследуемой территории, за исключением восточных районов Республики Коми, наблюдается уменьшение числа срочных наблюдений, во время которых были зафиксированы гололедные отложения. Наибольшая скорость многолетнего убывания таких случаев наблюдается в Амдерме (рис. 3). Это может быть связано с повышением летней температуры воздуха.

В прибрежных районах Мурманской и Архангельской областей с июля по сентябрь изменения незначительны и в большинстве случаев отсутствовали. Это объясняется тем, что в теплый период года для этих районов не характерно образование гололедных отложений.

Показано, что наибольшие изменения повторяемости срочных наблюдений, во время которых были зафиксированы гололедные отложения, проявляются в переходные сезоны года. В весенний период на большей части исследуемой территории происходит увеличение повторяемости таких наблюдений, а в осенний распределение случаев носит более сложный характер: неоднородное распределение по изучаемой области.

Общая направленность трендов такова, что там, где были максимумы повторяемости гололеда, их число еще более возросло за 1986–2022 гг. На территориях, где случаи гололеда в среднем происходили реже, их число на протяжении 37 лет уменьшалось.

Многолетние изменения числа дней с гололедом в СЗФО имеют общую тенденцию к увеличению, они были рассчитаны для каждой метеорологической станции. Средние для СЗФО ежегодные значения представлены на рис. 4. Как видно из полученных результатов, несмотря на заметный межгодовой разброс, тренд в целом положительный, а дисперсия временного ряда сохраняется. Среднее квадратическое отклонение, характеризующее пространственный разброс данных в пределах территории, составляет в среднем 7,8 дней в году (максимальный разброс 4,3 дней в году, максимальный — 12,4 дней в году).

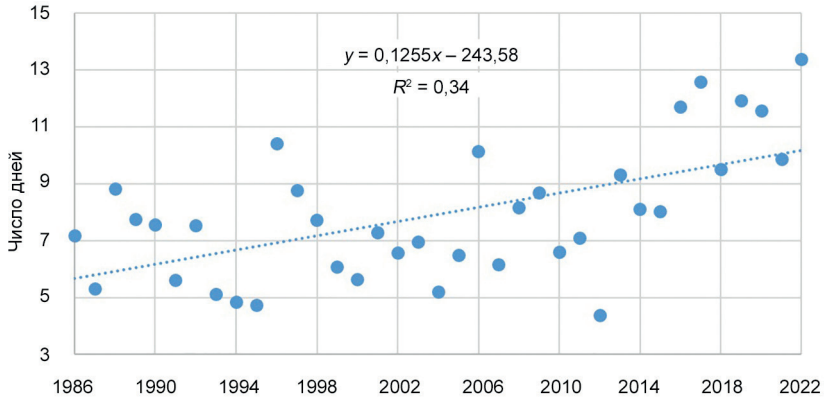

Рис. 4. Число дней с гололедом за год, 1986–2022 гг.

Fig. 4. Number of days with glaze ice per year, 1986–2022

Выводы

– Повторяемость гололедных отложений в течение года имеет неоднородное распределение по пространству СЗФО. Наибольшие значения характерны для центральной части округа, что может быть связано с оптимальным сочетанием температуры и влажности воздуха, количества осадков, поскольку в западной части продолжительность теплого сезона дольше, а в холодной восточной части по мере удаления от океана уменьшается влагосодержание воздуха.

– Сезонный максимум повторяемости гололедных отложений на большей части округа отмечается в холодный период и переходные сезоны, но в северо-восточной части наблюдается в летний сезон, что связано с малой продолжительностью теплого периода и его низкой температурой. Увеличение частоты явления гололеда в центре СЗФО может быть следствием влияния теплых секторов и осадков на атмосферных фронтах западных и южных циклонов, постепенно поворачивающих к северу.

– Тренд повторяемости гололедных отложений за период 1986–2022 гг. на территории СЗФО распределен по пространству неоднородно: в основном наибольшие значения коэффициента линейного тренда располагаются в тех же районах, где отмечаются наибольшие значения повторяемости в современном климате. Расчеты многолетних трендов для каждого месяца года показали, что они наиболее выражены в феврале и вносят наиболее весомый вклад в изменение годовой суммы повторяемости гололеда по сравнению с другими месяцами.

Конфликт интересов. Отсутствует.
Финансирование. Работа выполнена при поддержке Программы развития МГУ, проект № 23–Ш07–33.

Competing interests. None.
Funding. This work was done with the support of MSU Program of Development, Project No 23-SCH07-33.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Российский гидрометеорологический энциклопедический словарь* / Под ред. А.А. Бедрицкого. СПб.; М.: Летний сад; 2008. Т. 1: А–И. 336 с.
2. *Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 3. Часть I. Метеорологические наблюдения на станциях*. Л.: Гидрометеоиздат; 1985. 300 с.

3. Акимов В.А., Бедило М.В., Сущев С.П. Опасные метеорологические явления и процессы как источники чрезвычайных ситуаций природного характера: вербальная. *Технологии гражданской безопасности.* 2021;4(70):14–18. https://doi.org/10.54234/CST.19968493.2021.18.4.70.3.14

   Akimov V.A., Bedilo M.V., Sushchev S.P. Hazardous meteorological phenomena and processes as sources of natural emergencies: verbal. *Tekhnologii grazhdanskoi bezopasnosti = Civil Security Technologies*. 2021;4(70):14–18. (In Russ.). https://doi.org/10.54234/CST.19968493.2021.18.4.70.3.14

4. *Экология. Экономика. Информатика. Геоинформационные технологии и космический мониторинг.* Ростов н/Д: Изд-во ЮНЦ РАН; 2016. Т. 2 (1). 348 с.

5. Рубинштейн К. Г., Игнатов Р. Ю., Юсупов Ю. И., Титов Д. Е. Использование тепло-балансного метода для прогнозирования гололедно-изморозевых отложений на проводах воздушных линий электропередачи. *Энергия единой сети*. 2018;(2): 42–50.

   Rubinshtein K. G., Ignatov R. Iu., Iusupov Iu. I., Titov D. E. Use of heat-balance method for forecasting ice and frost deposits on wires of overhead power lines. *Energia edinoi seti = Energy of the Unified Network*. 2018;(2):42–50. (In Russ.)

6. *Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2022 год.* М.: Росгидромет; 2023. 104 с.

7. Алисов Б.П. *Климат СССР.* М.: Московский университет; 1956. 127 с.

8. Аржанова Н.М., Коршунова Н.Н. Характеристики гололедно-изморозевых явлений на территории России в условиях современных изменений климата. *Труды Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации — Мирового центра данных.* Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД»; 2021. 184: 33–44.

9. Аржанова Н.М., Коршунова Н.Н. Оценка многолетних изменений характеристик гололедно-изморозевых отложений на территории России. *Труды Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации — Мирового центра данных.* Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД»; 2021. 188: 18–29.

10. Groisman P. Y. Bulygina O.N., Yin X., Vose R., Gulev S.K., Hanssen-Bauer I., Førland E. Recent changes in the frequency of freezing precipitation in North America and Northern Eurasia. *Environmental Research Letters*. 2016;11(4):045007. https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/4/045007

11. Bulygina O.N., Arzhanova N.M., Groisman P.Y. Icing conditions over Northern Eurasia in changing climate. *Environmental research letters*. 2015;10(2):025003. https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/2/025003

12. Веселов В.М. Архивы Госфонда на ПЭВМ и технология их организации. *Труды ВНИИГМИ-МЦД*. Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД»; 2002. 170: 16–30.

13. *Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации*. Под ред. В. М. Катцова. СПб.: Наукоемкие технологии; 2022. 676 с.

Оригинальная статья / Original paper
https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-1-33-45
УДК 551.467+551.583

Мониторинг изменений климата в морской Арктике

Г.В. Алексеев✉, Н.Е. Харланенкова, Н.Е. Иванов, Н.И. Глок

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

✉alexgv@aari.ru

ГВА, 0000-0001-5630-647X; НЕХ, 0009-0001-8770-2894; НИГ, 0000-0002-9566-4402

Аннотация. Получены репрезентативные показатели климатических изменений температурного и ледового режима морской Арктики и влияющих на них факторов в современный период. Использована среднемесячная приповерхностная температура воздуха на гидрометеорологических станциях в этой области, а также данные реанализов. Для характеристики предыстории температурного режима использованы ряды наблюдений с 1901 г. Изменения ледового режима оцениваются по значениям ледовитости на сайте ААНИИ, а влияние температуры океана — по среднемесячным значениями температуры поверхности океана из реанализа HadISST и температуры воды в слое 50–200 м на разрезе по Кольскому меридиану. Связь параметров температурного режима и влияющих факторов характеризуется коэффициентами корреляции и корреляционными графами. Показана определяющая роль в развитии потепления в Арктике тепла и влаги с атмосферными и океанскими переносами из прилегающих и низких широт и возможность перспективной оценки климатических изменений.

Ключевые слова: индикаторы, климат, мониторинг, морская Арктика, морской лед, температура воздуха

Для цитирования: Алексеев Г.В., Харланенкова Н.Е., Иванов Н.Е., Глок Н.И. Мониторинг изменений климата в морской Арктике. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2024;70(1):33–45. https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-1-33-45

Поступила 23.11.2023 **После переработки 27.02.2024** **Принята 04.03.2024**

Monitoring climate change in the marine Arctic

Geinrich V. Alekseev✉, Natalia E. Kharlanenkova, Nikolai E. Ivanov, Natalia I. Glok

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

✉alexgv@aari.ru

GVA, 0000-0001-5630-647X; NEK, 0009-0001-8770-2894; NIG, 0000-0002-9566-4402

Abstract. Changes in the temperature regime of the marine Arctic and the influencing factors are considered based on the current knowledge of the causes of climate change and the use of new data sources. In the Arctic, the warming is developing due to such factors as the increase in the transfer of heat and moisture from the low latitudes. This, in turn, drives the feedbacks in the Arctic climate system, increasing the flow of long-wave radiation to the surface due to rising atmospheric water vapor concentrations and slowing down the growth of the sea ice thickness in winter. The increase in the atmospheric heat transfer to the Arctic is associated with changes in atmospheric circulation, in particular, under the influence of ocean surface temperature anomalies, especially in the low latitudes since the bulk of the heat influx from the from solar radiation and anthropogenic forcing is accumulated here. Analyzing the causes of warming in the Arctic in the 1930s and 40s led researchers to the conclusion that the water influx from the North Atlantic is a factor to consider. Therefore, the influx of warm and salty water is also an important influence on the formation of the climate of the marine Arctic today, which should be taken into account when monitoring the temperature and ice regime of this area. Based on the analysis of the characteristics of climate variability in the marine Arctic and its causes, the article examines representative indicators of climate change in the temperature and ice regime of the marine Arctic and the factors influencing them in the present period.

Keywords: marine Arctic, climate, monitoring, air temperature, sea ice, indicators

For citation: Alekseev G.V., Kharlanenkova N.E., Ivanov N.E., Glok N.I. Monitoring climate change in the marine Arctic. *Arctic and Antarctic Research*. 2024;70(1):33–45. (In Russ.). https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-1-33-45

Received 23.11.2023 **Revised 27.02.2024** **Accepted 04.03.2024**

Введение

Мониторинг температурного режима как часть мониторинга климата Арктики основан на использовании данных наблюдений на метеорологических станциях, расположенных к северу от 60° с. ш. (*Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2022 год*. М.: Росгидромет, 2023. 104 с. https://meteoinfo.ru/images/media/climate/rus-clim-annual-report.pdf (дата обращения: 04.11.2023)), и данных реанализов (Druckenmiller M.L., Thoman R.L., Moon T.A. (Eds.) *Arctic Report Card 2022*; 2022. https://doi.org/10.25923/yjx6-r184 (дата обращения: 04.11.2023)), т. е., в значительной части, вне Арктики. При этом отсутствуют обоснование такого выбора и общепринятая технология оценивания параметров температурного режима. Это приводит к различающимся оценкам, в частности, так называемого «арктического усиления» современного потепления климата. Репрезентативные индикаторы изменений температурного режима Арктики и влияющих факторов могут быть предложены, исходя из современных знаний о причинах изменений климата Арктики и широкого использования новых источников данных.

Основной причиной глобального потепления считается рост концентрации парниковых газов в атмосфере в результате деятельности человека [1]. В Арктике глобальное потепление развивается с участием роста переноса тепла и влаги из низких широт [2], которое, в свою очередь, приводит в действие обратные связи в арктической климатической системе [3–5] и увеличение притока длинноволновой радиации к поверхности вследствие роста концентрации водяного пара в атмосфере, вызывающего замедление роста толщины морского льда [6].

Рост меридиональных атмосферных переносов тепла в Арктику связан с изменениями циркуляции атмосферы, в частности, в результате внешних воздействий на пространственно-временное распределение и интенсивность атмосферных циркуляционных структур. Значительное влияние на атмосферную циркуляцию и, следовательно, на атмосферный перенос тепла оказывают аномалии температуры поверх-

ности океана (ТПО) [7–9]. Особенно велика роль аномалий температуры поверхности океана в низких широтах, поскольку здесь запасается основная часть притока тепла сверху от солнечной радиации и антропогенного форсинга [10–12].

Анализ причин потепления в Арктике в 1930–1940-е гг. привел исследователей к выводу о влиянии притока воды из Северной Атлантики [13–15].

Поступление теплой и соленой воды является важным процессом и для формирования современного климата морской Арктики, который также следует учитывать при мониторинге температурного и ледового режима этой арктической области.

Цель статьи — представить на основе анализа особенностей изменчивости климата в морской Арктике, ее причин, использования обширных и новых данных репрезентативные показатели климатических изменений температурного и ледового режима морской Арктики и влияющих на них факторов в современный период.

Материалы и методы

Для оценки изменений температурного режима с 1951 г. использована среднемесячная приповерхностная температура воздуха (ПТВ) на 41 гидрометеорологической станции в области морской Арктики, собираемая на сайтах rp5.ru и pogodaiklimat.ru.

Показателями служат средние значения ПТВ на 41 станции за каждый месяц, сезон и год. Также рассчитываются средние ПТВ на 24 станциях, расположенных на островах и побережье четырех морей Северного морского пути (СМП), и средние ПТВ для отдельных морей. Для характеристики предыстории изменений температурного режима использованы наиболее продолжительные ряды наблюдений (с 1901 г.) на 7 арктических гидрометеорологических станциях.

Среднемесячная ПТВ в узлах регулярной сетки из реанализов NCEP (http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/) и ERA5 (https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5) применялась для сравнения средней температуры, рассчитанной по станциям и по значениям в узлах сетки, а также для расчета показателей влияющих факторов. Среднемесячные значения площади, покрытой морским льдом (ледовитость в км^2) в Северном Ледовитом океане (СЛО), в морях СМП взяты с сайта ААНИИ (http://wdc.aari.ru/datasets/ssmi/data/north/extent/). Для расчета показателей влияющих факторов использовались среднемесячные значения температуры поверхности океана, представленные в реанализе HadISST (http://hadobs.metoffice.com.hadsst/), среднемесячные значения средней температуры воды в слое 50–200 м на разрезе по Кольскому меридиану, представленные на сайте ПИНРО (http://www.pinro.vniro.ru/ru/razrez-kolskij-meridian/ryady-nablyudenij/).

Оценки параметров температурного режима и показателей влияющих факторов получены путем осреднения наблюдений на арктических гидрометеорологических станциях и пространственного осреднения данных реанализов. Связь между ними характеризуется коэффициентами корреляции, а обобщение связей осуществляется с использованием корреляционных графов.

Результаты

Температура воздуха

Оценки изменений приповерхностной температуры воздуха в области морской Арктики по данным 41 станции на островах и побережье Северного Ледовитого океана зимой и летом с 1951 по 2023 г. показаны на рис. 1 (*а–в*). С середины 1990-х гг. по 2020 г. температура здесь повысилась зимой более чем на 4 °С, а летом — на 2 °С.

После 2018 г. ПТВ зимой понизилась к 2023 г. на 2 °С. Летом понижение ПТВ в эти годы составило 0,5 °С.

В 2010-е гг. особенно заметно потеплело на акватории сибирских арктических морей (Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское, Чукотское моря), по которым проходит Северный морской путь. Данные метеорологических станций на побережье и островах морей (рис. 1*г–е*) показывают повышение зимней температуры воздуха с 1970-х гг. по 2018 г. на 6 °С, а летней к 2020 г. почти на 3 °С. К 2023 г. зимой температура понизилась на 3,5 °С, а летом на 2,6 °С. Замедление роста температуры воздуха и начало понижения после 2020 г. более очевидно в изменениях средней ПТВ на 7 станциях с началом наблюдений в 1901 г. (рис. 1*ж–и*).

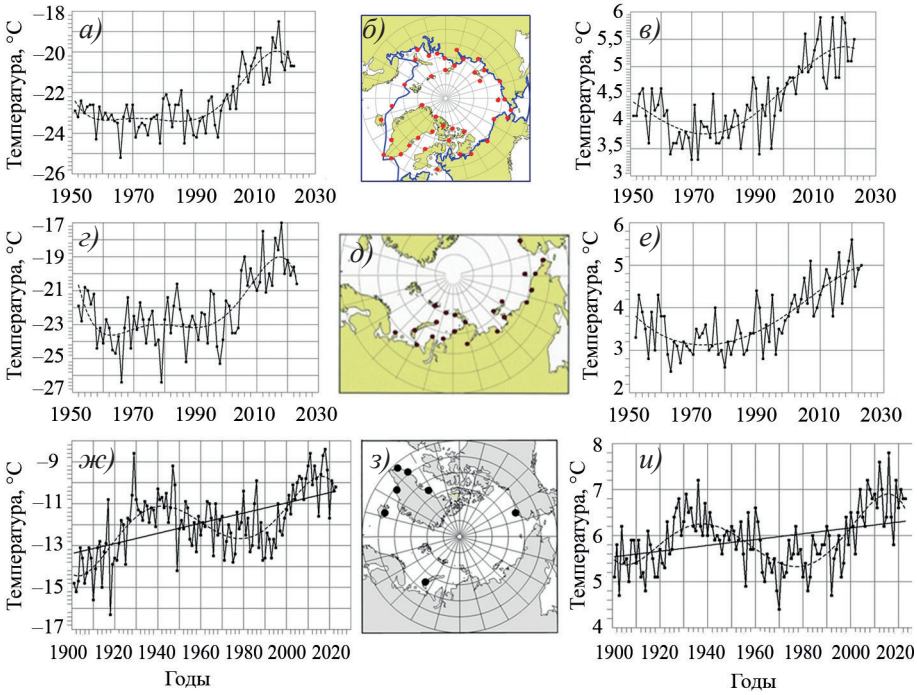

Рис. 1. Средняя температура воздуха зимой (*а, г, ж*) и летом (*в, е, и*) по данным метеорологических станций в Арктике (*б, д, з*) с 1901 по 2023 г.
Приповерхностная температура воздуха в 1951–2023 гг. средняя за декабрь–февраль (*а*) и за июнь–август (*в*) на 41 станции в морской Арктике (*б*). Средняя температура воздуха на акватории сибирских арктических морей зимой (*г*) и летом (*е*) в 1951–2023 гг. *д* — метеорологические станции на побережье и островах арктических морей. Средняя температура воздуха на 7 арктических станциях в 1901–2023 гг. зимой (*ж*) и летом (*и*); *з* — метеорологические станции в морской Арктике с длительными наблюдениями. Пунктир — полином 5-й степени

Fig. 1. Average air temperature in winter and summer in the marine Arctic.
Average surface air temperature for December–February (*а*) and June–August (*в*) at 41 stations in the marine Arctic (*б*) in 1951–2023. Average air temperature of the Siberian Arctic seas in winter (*г*) and in summer (*е*) in 1951–2023; *д* — meteorological stations on the coast and islands of the Arctic seas. Average air temperature at 7 Arctic stations in winter (*ж*) and in summer (*и*) in 1901–2023; *з* — meteorological stations in the maritime Arctic with long-term observations. The dotted line is a fifth degree polynomial

В изменениях температуры в 1901–2023 гг. очевидно присутствие на фоне тренда квазипериодического колебания с наложением межгодовой изменчивости. Происхождение этого примерно 70-летнего колебания связано с Атлантической междесятилетней осцилляцией (АМО) [8, 9, 16], выделяемой в изменчивости температуры поверхности океана в Северной Атлантике с конца XIX в. в виде 60–80-летнего колебания [17]. Воспроизведение АМО в экспериментах на глобальной модели циркуляции океана [18] подтверждает реальность и устойчивость этого феномена динамики Атлантического океана. 70-летнее квазиперодическое колебание вместе с трендом на рис. 1 образуют низкочастотное изменение, которое вносит основной вклад в изменчивость ПТВ в 1901–2023 гг., достигающий 93 % для средней за год ПТВ и 75 и 80 % для средних за осенние и зимние месяцы, что может послужить основой для экстраполяции ПТВ на следующий 70-летний цикл [16].

Сокращение морского ледяного покрова

Потепление в Арктике сопровождается сокращением площади морского льда. Тренды средней ледовитости во все месяцы отрицательны, кроме отдельных незначимых близких к нулю трендов в арктических морях с февраля по апрель (рис. 2*а*). Минимальные по абсолютной величине тренды приходятся на апрель, а максимальные — на октябрь. Рост трендов ледовитости с мая по июль противоположен уменьшению трендов температуры в эти месяцы (рис. 2*б*), что может указывать на охлаждающее влияние растущего таяния снега и льда и прогрева воды в эти месяцы.

В СЛО ледовитость в сентябре сократилась от максимума в 1980 г. до минимума в 2012 г. на 54 %, или в 2,2 раза. При этом сокращение тесно связано с ростом летней температуры воздуха (рис. 3*а*). На акватории морей СМП площадь морского льда (ПМЛ) в сентябре (рис. 3*б*) быстро сокращалась с 1996 г. вместе с ростом летней температуры воздуха и за десять лет к 2005 г. уменьшилась с 1892 тыс. км^2 до 234 тыс. км^2. В последующие годы площадь колебалась вблизи этого уровня

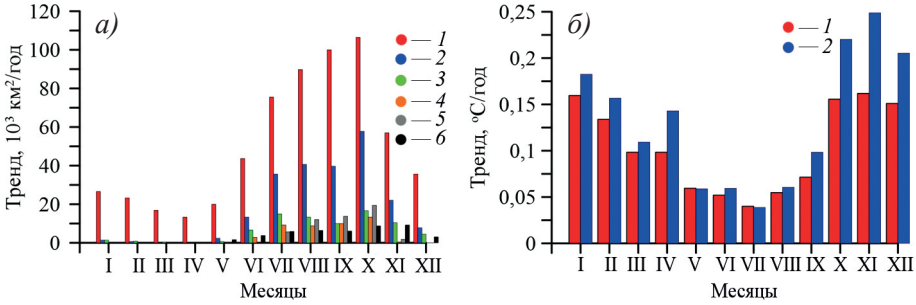

Рис. 2. Коэффициенты тренда среднемесячной ледовитости (*а*) и температуры воздуха (*б*) в морской Арктике.
а: *1* — Северный Ледовитый океан; *2* — моря Северного морского пути (*3* — Карское, *4* — Лаптевых, *5* — Восточно-Сибирское и *6* — Чукотское). *б*: *1* — Северный Ледовитый океан; *2* — моря Северного морского пути (Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское и Чукотское)

Fig. 2. Trend coefficients of average monthly sea ice extend (*a*) and air temperature (*б*) in the marine Arctic.
a: *1* — Arctic Ocean; *2* — seas of the Northern Sea Route (*3* — Kara, *4* — Laptev, *5* — East Siberian and *6* — Chukchi Sea). *б*: *1* — Arctic Ocean; *2* — seas of the Northern Sea Route (Kara, Laptev, East Siberian and Chukchi Sea)

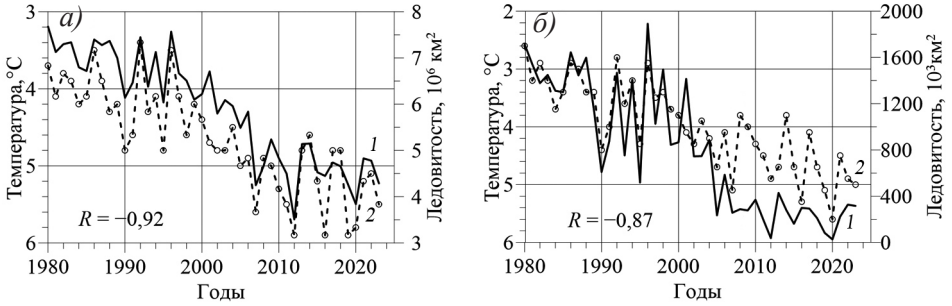

Рис. 3. Площадь, занятая морским льдом в сентябре, и летняя температура воздуха на акватории Северного Ледовитого океана (*а*) и морей Северного морского пути (*б*) в 1980–2023 гг. *R* — коэффициенты корреляции

Fig. 3. Sea ice extend in September and summer air temperature in the Arctic Ocean (*a*) and the seas of the Northern Sea Route (*б*) in 1980–2023. *R* — correlation coefficients

с минимальным значением 26,3 тыс. км^2 в 2020 г., меньшим, чем предшествующий минимум 2012 г. (37 тыс. км^2). В 2023 г. площадь льда возросла до 316 тыс. км^2.

Зимой сокращение ледовитости много меньше, чем летом. Сокращение от максимума в марте 1982 г. до минимума в марте 2016 г. в СЛО составило 9 % при тренде — 17 тыс. км^2 в год. В морях СМП в марте сокращение ледовитости от максимума в 1979 г. до минимума в 2017 г. составило чуть более 1 %, а тренд на сокращение — 321 км^2 в год. При этом зависимость ледовитости в марте от зимней температуры воздуха характеризуется значительно более низкими коэффициентами корреляции по сравнению с зависимостью ледовитости в сентябре от летней температуры воздуха: корреляция между ледовитостью в марте и температурой в декабре–феврале в СЛО составляет –0,72 (летом –0,92), а в морях СМП –0,48 (летом –0,87).

Факторы, влияющие на потепление и сокращение морского ледяного покрова

Связь зимней температуры воздуха с ледовитостью в сентябре характеризуется более сильной корреляцией по сравнению с ледовитостью в марте: для СЛО коэффициент корреляции равен –0,77, а для морей СМП — –0,67. Еще более очевидна связь зимней температуры и ледовитости в сентябре при сопоставлении с суммой градусо-дней мороза (СГДМ) за октябрь–апрель: в СЛО коэффициент корреляции СГДМ и ледовитости в сентябре равен –0,87, в морях СМП — –0,80. Причина этого «парадокса» кроется в зависимости между СГДМ и толщиной [19, 20] или объемом льда [11], при уменьшении которых летнее сокращение ледяного покрова растет. На рис. 4*а–в* показаны изменения нисходящей длинноволновой радиации (НДВР), СГДМ и параметров ледяного покрова СЛО.

Из рисунка следует, что более 70 % межгодовой изменчивости максимального объема льда в апреле и ледовитости СЛО в сентябре связаны с изменениями СГДМ, которая, в свою очередь, зависит от НДВР. Изменения НДВР зимой в Арктике практически полностью зависят от изменений температуры воздуха и содержания водяного пара (СВП) в атмосфере, подверженных влиянию притоков из низких широт. Показано [11], что перенос тепла и влаги в Арктику увеличивается под влиянием повышения температуры поверхности океана, сопровождающегося ростом температуры воздуха и содержания водяного пара в атмосфере над океаном, а усилившаяся циркуляция

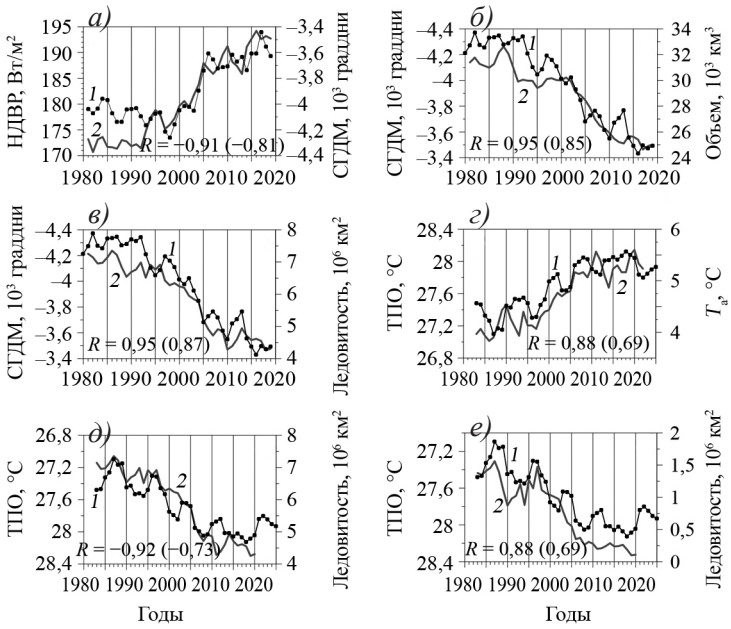

Рис. 4. Изменение параметров атмосферы и морского льда в Арктике и связь с изменениями ТПО в тропической Северной Атлантике: *а* — НДВР зимой (*1*) по данным ERA5 в области (70–87,5° с. ш.) и СГДМ по данным 41 станции в морской Арктике (*2*); *б* — СГДМ (*1*) и апрельский объем льда в Северном Ледовитом океане по расчету на модели AARI–IOCM (*2*); *в* — СГДМ (*1*) и ледовитость СЛО в сентябре; *г* — ТПО (*1*) в октябре и средняя ПТВ летом в морской Арктике (*2*) с запаздыванием на 3 года; *д* — ТПО (*1*) в октябре и ледовитость СЛО в сентябре (*2*) с запаздыванием 4 года; *е* — ТПО (*1*) в октябре и ледовитость на СМП (*2*) с запаздыванием 4 года. Ряды сглажены с 3-летним окном.

R — коэффициенты корреляции между (*1*) и (*2*), в скобках — между несглаженными рядами

Fig. 4. Changes in atmospheric and sea ice parameters in the Arctic and relationship with changes in SST in the tropical North Atlantic: *a* — STRD in winter (*1*) according to ERA5 data in the region (70–87,5° N) and SDDF according to data from 41 stations in the marine Arctic (*2*); *б* — SDDF (*1*) and April ice volume in the Arctic Ocean as calculated using the AARI–IOCM model (*2*); *в* — SDDF (*1*) and ice cover in the Arctic Ocean in September; *г* — SST (*1*) in October and average SAT in summer in the marine Arctic (*2*) with a lag of 3 years; *д* — SST (*1*) in October and SIE in the Arctic Ocean in September (*2*) with a lag of 4 years; *е* — SST (*1*) in October and SIE on the NSR (*2*) with a lag of 4 years. The series are smoothed with a 3-year window.

R — correlation coefficients between (*1*) and (*2*), in brackets — between unsmoothed series

атмосферы и океана способствует переносу теплого и влажного воздуха и нагретой воды в умеренные и высокие широты. Примеры связи между изменениями ТПО в тропической Северной Атлантике и характеристиками климата Арктики см. на рис. 4*г–е*.

Оценка влияния атмосферной циркуляции на температурный режим и усиление потепления в Арктике

Температурный режим Арктики находится под влиянием атмосферных переносов тепла и влаги из более низких широт, изменяющихся вместе с колебаниями циркуляции атмосферы. В качестве индикаторов влияния атмосферной циркуляции на температурный режим предложен [21] индекс D_M, представляющий меридио-

нальный контраст приповерхностной температуры воздуха. Основанием послужила связь между усилением переноса тепла и влаги атмосферной циркуляцией и пространственным контрастом приповерхностной температуры воздуха. Формула для расчета индекса D_M имеет вид:

$$D_M = \left\langle \left(T_\varphi - \left\langle T_\varphi \right\rangle \right)^2 \right\rangle_\varphi, \; T_\varphi = \left\langle T_{\varphi\lambda} \right\rangle_\lambda, \; \left\langle T_\varphi \right\rangle = \left\langle T_\varphi \right\rangle_\varphi, \qquad (1)$$

где T — приповерхностная температура воздуха, угловые скобки означают осреднение по широте φ или по долготе λ.

Результаты расчетов индексов в сопоставлении с температурой воздуха в области 70–87,5° с. ш. показаны на рис. 5. В левой колонке индексы и температура зимой, в правой — летом.

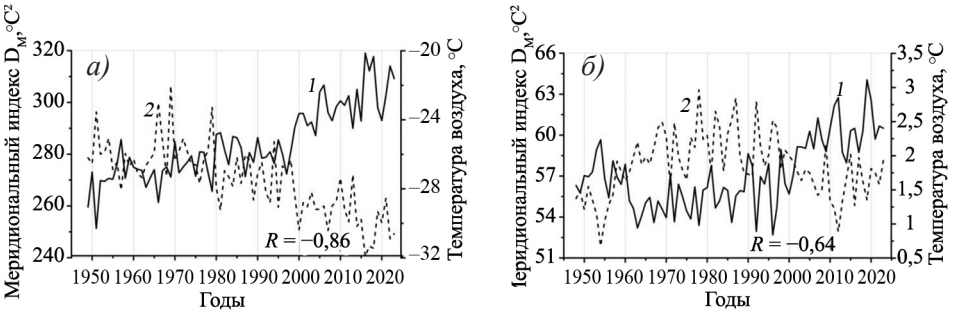

Рис. 5. Меридиональный индекс D_M и температура воздуха в области 70–87,5° с. ш., рассчитанные по данным реанализа NCEP за 1948–2023 гг.: *а* — зима; *б* — лето

Fig. 5. Meridional index D_M and air temperature in the region of 70–87,5 N, calculated from NCEP reanalysis data for 1948–2023: *а* — winter; *б* — summer

Меридиональный индекс отражает тренд на потепление в области 70–87,5° с. ш. и межгодовые вариации температуры зимой и летом, но летом связь между индексом и температурой слабее.

Атмосферная циркуляция влияет и на усиление изменчивости и трендов температуры воздуха в высоких широтах Северного полушария. Количественная оценка вклада атмосферных переносов в формирование изменчивости и трендов средней приповерхностной температуры воздуха в Арктике получена [22] с помощью простой модели атмосферы и данных реанализов NCEP и ERA5 за 1989–2020 гг. на основе представления о множестве событий воздухообмена между широтами.

Обмен больше влияет на усиление тренда в зимние и позднеосенние месяцы и менее всего летом с минимумом в июле. Рост вклада в августе–ноябре с максимумом в октябре, вероятно, связан с растущим влиянием осеннего охлаждения и ледообразования в арктических морях, а летний минимум кроме ослабления циркуляции атмосферы — также с таянием снега и льда в Арктике. Обменом можно объяснить 54 % усиления тренда температуры воздуха (арктического усиления) в области 60–90° с. ш. в среднем за год и 66 % в холодную часть года относительно остальной части Северного полушария. Отсюда следует, что арктическое усиление в значительной степени является свойством изменчивости температуры воздуха на земном шаре, формируемым вихревым обменом в атмосфере в присутствии разности температуры между экватором и полюсом и тренда, которые поддерживаются внешними воздействиями.

Обсуждение и выводы

В статье рассмотрены новые репрезентативные индикаторы изменений климатического режима морской Арктики, исходя из современных знаний о причинах изменений климата с использованием новых источников данных, включая массивы реанализов. Значение исследований в этом направлении растет, поскольку изменения климата Арктики составляют одно из актуальных и дискуссионных направлений современных климатических исследований. Потепление, происходящее с конца XX в. и усилившееся здесь в начале XXI в., привлекает особое внимание, а сокращение площади морского льда стало наиболее обсуждаемым его проявлением. Установлено, что температура воздуха в морской Арктике и на акватории морей Северного морского пути достигла максимума в десятилетие 2011–2020 гг. и наметился ее спад. Площадь, занятая морским льдом на сезонном минимуме в сентябре, стабилизировалась с 2007 г. на уровне 4500 и 200 тыс. км^2, соответственно в СЛО и на СМП.

Анализ причин климатических изменений в морской Арктике показал определяющую роль в развитии потепления тепла и влаги, поступающих с атмосферными и океанскими переносами из прилегающих и низких широт, и продемонстрировал возможности перспективной оценки климатических изменений. Увеличение теплового нисходящего длинноволнового излучения на поверхности под влиянием растущего притока тепла и водяного пара из прилегающих широт, прежде всего со стороны Атлантики, замедляет нарастание морского льда зимой. Индикаторами процесса являются содержание водяного пара в атмосфере (СВП), нисходящая тепловая радиация (НДВР) и сумма градусо-дней морозов (СГДМ) на поверхности, которые тесно связаны друг с другом и с параметрами ледяного покрова.

Более 70 % межгодовой изменчивости максимального объема льда в апреле и ледовитости СЛО в сентябре связаны с изменениями СГДМ, которая, в свою очередь, зависит от НДВР. Изменения НДВР зимой в Арктике практически полностью зависят от изменений температуры воздуха и содержания водяного пара в атмосфере, подверженных влиянию притоков из низких широт.

Перенос тепла и влаги в Арктику увеличивается под влиянием повышения температуры поверхности океана в низких широтах. Усиленная потеплением циркуляция атмосферы и океана способствуют переносу теплого и влажного воздуха и нагретой воды в умеренные и высокие широты. Показано, что ТПО в октябре в тропической Северной Атлантике и ледовитость СЛО и в морях СМП в сентябре связаны с запаздыванием на 4 года коэффициентами корреляции 0,91–0,92 после сглаживания рядов с окном 3 года (0,70–0,73 без сглаживания), что указывает на прогностический потенциал установленных связей. Изменения ТПО в тропиках проявляются через 3 года в поступлении теплой и соленой воды из Северной Атлантики в Северо-Европейский бассейн, индикатором которого служит температура воды в слое 50–200 м на разрезе по Кольскому меридиану в Баренцевом море по данным ПИНРО (pinro.ru/labs/hid/kolsec22.php). Наиболее тесная связь между температурой воды на Кольском разрезе и ледовитостью Баренцева моря приходится на период с января по июнь (коэффициенты корреляции от –0,70 до –0,87 (от –0,80 до –0,95 после сглаживания по 3 года)).

Обобщающая схема установленных связей между низкими широтами, приатлантической и морской Арктикой представлена на рис. 6. Согласно схеме ТПО в экваториальной области 10° ю. ш.–10° с. ш. в августе определяет изменения температуры

воздуха и содержания водяного пара в области 0–25° с. ш. и ТПО в тропической части Северной Атлантики (5–25° с. ш., 60–10° з. д.) в октябре. ТПО в этой части Северной Атлантики влияет на изменения ТПО зимой в Норвежском, Гренландском и Баренцевом морях через 27 месяцев (на 3-й год). Индикатором изменений служит температура воды в слое 50–200 м на разрезе по Кольскому меридиану в декабре–январе. Последующий рост температуры воздуха и содержания водяного пара в Арктике под влиянием атмосферных переносов из приатлантической части способствуют повышению притока длинноволновой радиации к поверхности снега и льда, уменьшению суммы отрицательных температур воздуха и зимнего нарастания льда, что в последующем ускоряет летнее сокращение ледяного покрова.

В качестве индикатора влияния атмосферной циркуляции предложен [21] индекс D_M, представляющий меридиональный контраст приповерхностной температуры воздуха. Индекс отражает тренд на потепление в области 70–87,5° с. ш. и межгодовые вариации температуры зимой и летом, но летом связь между индексом и температурой слабее. Оценено влияние атмосферной циркуляции на усиление изменчивости и трендов температуры воздуха в высоких широтах Северного полушария, и сделан вывод, что арктическое усиление в значительной степени является свойством изменчивости температуры воздуха на земном шаре, формируемым вихревым обменом в атмосфере в присутствии разности температуры между экватором и полюсом и тренда, которые поддерживаются внешними воздействиями.

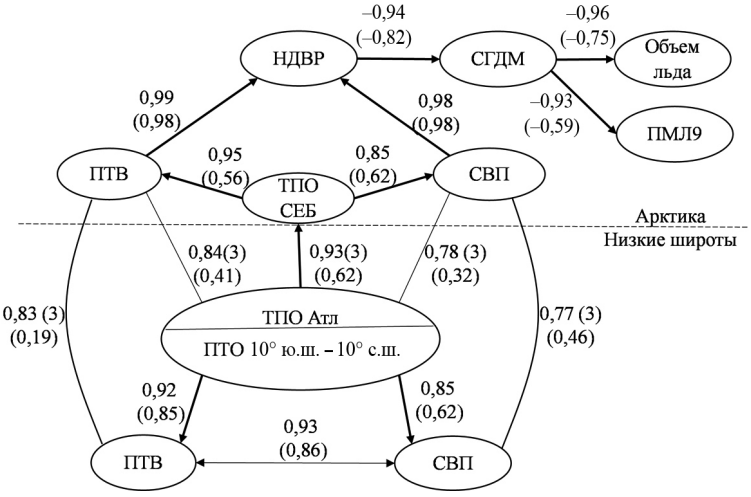

Рис. 6. Граф корреляций, связывающих ТПО в низких широтах и параметры климата и морского льда в Арктике.

В овалах указаны параметры атмосферы и океана. Связи обозначены стрелками, у которых проставлены соответствующие коэффициенты корреляции. Рядом в скобках проставлены запаздывания (в годах). Линии без стрелок отражают формальные корреляции между параметрами. Ряды коррелируемых параметров сглажены скользящим осреднением с временным окном 3 года. В скобках ниже указаны корреляции без тренда

Fig. 6. Graph of correlations linking sea surface temperature at low latitude and climate and sea ice parameters in the Arctic.

Atmospheric and oceanic parameters are shown in ovals. The arrows show the connections with corresponding correlation coefficients. Delays (in years) are shown in the brackets nearby. The lines without arrows are formal correlations between parameters. The series of correlated parameters are smoothed with a window of 3 years. Detrended correlations are shown in brackets below

В заключение перечислим параметры температурного и ледового режима и показатели влияющих факторов, предлагаемые для мониторинга изменений климата в морской Арктике:

– TmA_sm — среднемесячная приповерхностная температура воздуха летом (июнь–август) над СЛО по данным 41 ГМС, °С;

– SGDM SLO — сумма градусо-дней мороза (октябрь–апрель) над СЛО по данным 41 ГМС;

– SMP_Tsm — среднемесячная приповерхностная температура воздуха летом (июнь–август) над морями СМП, рассчитанная по данным 24 ГМС, °С;

– SGDM SMP — сумма градусо-дней мороза (октябрь–апрель) над морями СМП, рассчитанная по данным 24 ГМС;

– T7mA — средняя температура воздуха летом (июнь–август), рассчитанная по данным на 7 арктических станциях с 1901 г., °С;

– Ледовитость СЛО в сентябре, $\times 10^3$ км^2, по данным http://wdc.aari.ru/datasets/ssmi/data/north/extent/slo/;

– Ледовитость морей СМП, $\times 10^3$ км^2, по данным http://wdc.aari.ru/datasets/ssmi/data/north/extent/smp/;

– Dm_wn — индекс меридиональной циркуляции над Северным полушарием зимой, рассчитанный по данным реанализа НСЕП, (°С)^2;

– Dm_sm — индекс меридиональной циркуляции над Северным полушарием летом, рассчитанный по данным реанализа НСЕП, (°С)^2;

– SST_10 — среднемесячная температура поверхности океана в районе тропической Северной Атлантики (10–60° з. д., 5–25° с. ш.) в октябре, °С, рассчитанная по данным реанализа HadISST;

– ТКМ — температурой воды в слое 50–200 м на разрезе по Кольскому меридиану (Ткм) в декабре–феврале по данным сайта http://www.pinro.vniro.ru/ru/razrez-kolskij-meridian/ryady-nablyudenij/.

Рассчитанные параметры и показатели заносятся в климатическую базу данных на сайте ААНИИ в виде климатических рядов (http://old.aari.ru/main.php?lg=0&id=466).

Конфликт интересов. Конфликт интересов отсутствует.

Финансирование. Статья подготовлена на основе результатов проекта НИТР 3.2 (мониторинг температурного и ледового режима морской Арктики) и при поддержке РНФ проект 23-47-10003 (оценки влияния атмосферной циркуляции на усиление изменчивости и трендов температуры).

Competing interests. No conflict of interests.

Funding. The article was prepared based on the results of the NITR 3.2 project (monitoring the temperature and ice regime of the marine Arctic) and with the support of the Russian Science Foundation project 23-47-10003 (assessing the influence of atmospheric circulation on increasing temperature variability and trends).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

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

2. Alekseev G.V., Kuzmina S.I., Bobylev L.P., Urazgildeeva A.V., Gnatiuk N. Impact of atmospheric heat and moisture transport on the Arctic warming. *Int J Climatol*. 2019;39(8):3582–35925. https://doi.org/10.1002/joc.6040

3. Семенов В.А. Колебания современного климата, вызванные обратными связями в системе атмосфера — полярные льды — океан. *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2015;1:232–248.

   Semenov V.A. Fluctuations in modern climate caused by feedbacks in the atmosphere — polar ice — ocean system. *Fundamental and applied climatology*. 2015;1:232–248. (In Russ.)

4. Иванов В.В. Современные изменения гидрометеорологических условий в Северном Ледовитом океане, связанные с сокращением морского ледяного покрова. *Гидрометеорология и экология*. 2021;64:407–434. https://doi.org/10.33933/2713-3001-2021-64-407-434

   Ivanov V.V. Contemporary changes in hydrometeorological conditions in the Arctic Ocean associated with a decrease in sea ice cover. *Hydrometeorology and ecology*. 2021;64:407–434. (In Russ.). https://doi.org/10.33933/2713-3001-2021-64-407-434

5. Winton M. Amplified Arctic climate change: What does surface albedo feedback have to do with it? *Geophys. Res. Lett*. 2006;33:L03701. https://doi.org/10.1029/2005GL025244

6. Cao Y., Liang S., Chen X., He, T., Wang, D., Cheng, X. Enhanced wintertime greenhouse effect reinforcing Arctic amplification and initial sea-ice melting. *Scientific Reports*. 2017;7(8462). https://doi.org/10.1038/s41598-017-08545-2

7. Николаев Ю.В. *Крупномасштабное взаимодействие океана и атмосферы и формирование аномалий погоды*. Л.: Гидрометеоиздат; 1981. 51 с.

8. Kushnir Y. Interdecadal variations in North Atlantic sea surface temperature and associated atmospheric conditions. *Climate*. 1994;7(1):141–157. https://doi.org/10.1175/1520-0442(1994)007<0141:IVINAS>2.0.CO;2

9. Robertson A.W., Mechoso C.R., Kim Y.-J. The influence of Atlantic sea surface temperature anomalies on the North Atlantic Oscillation. *Climate*. 2000;13(1):122–138. https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<0122:TIOASS>2.0.CO;2

10. Shin S.I., Sardeshmukh P.D. Critical influence of the pattern of Tropical Ocean warming on remote climate trends. *Climate Dynamics*. 2010;36(7):1577–1591. https://doi.org/10.1007/s00382-009-0732-3

11. Alekseev G.V., Glok N.I., Vyazilova A.E., Kharlanenkova N.E., Kulakov M.Y. Influence of SST in low latitudes on the Arctic warming and sea ice. *J. Mar*. Sci. Eng. 2021;9(10):1145. https://doi.org/10.3390/jmse9101145

12. Hoerling M.P., Hurrell J. W., Xu T. Tropical origins for recent North Atlantic climate change. *Science*. 2001;292(5514):90–92. https://doi.org/10.1126/science.1058582

13. Алексеев Г.В., Кузмина С.И., Глок Н.И., Вязилова А.Е., Иванов Н.Е., Смирнов А.В. Влияние Атлантики на потепление и сокращение морского ледяного покрова в Арктике. *Лед и Снег*. 2017;57(3):381–390. https://doi.org/10.15356/2076-6734-2017-3-381-390

    Alekseev G.V., Kuzmina S.I., Glok N.I., Viazilova A.E., Ivanov N.E., Smirnov A.V. The Atlantic's influence on warming and shrinking sea ice in the Arctic. *Ice and Snow*. 2017;57(3):381–390. (In Russ.). https://doi.org/10.15356/2076-6734-2017-3-381-390

14. Årthun M., Eldevik T. On anomalous ocean heat transport toward the Arctic and associated climate predictability. *Climate*. 2016;29(2):689–704. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0448.1

15. Семенов В. А. Влияние океанического притока в Баренцево море на изменчивость климата в Арктике. *Доклады РАН*. 2008;418(1):106–109.

    Semenov V. A. The influence of ocean inflow into the Barents Sea on climate variability in the Arctic. *Reports of the Russian Academy of Sciences*. 2008;418(1):106–109. (In Russ.)

16. Алексеев Г.В., Вязилова А.Е., Глок Н.И., Иванов, Н.Е., Харланенкова, Н.Е. Влияние аномалий температуры воды в низких широтах океана на колебания климата Арктики и их предсказуемость. *Арктика: экология и экономика*. 2019;3(35):73–83. https://doi.org/10.25283/2223-4594-2019-3-73-83

    Alekseev G.V., Viazilova A.E., Glok N.I., Ivanov N.E., Kharlanenkova N.E. The influence of water temperature anomalies in low latitudes of the ocean on climate fluctuations in the Arctic and their predictability. *Arctic: ecology and economics*. 2019;3(35):73–83. (In Russ.). https://doi.org/10.25283/2223-4594-2019-3-73-83

17. Schlesinger M.E., Ramankutty N. An oscillation in the global climate system of period 65–70 years. *Nature*. 1994;367(6465):723–726. https://doi.org/10.1038/367723a0

18. Панин Г.Н., Дианский Н.А., Соломонова И.В., Гусев А.В., Выручалкина Т.Ю. Оценка климатических изменений в Арктике в XXI столетии на основе комбинированного прогностического сценария. *Арктика: экология и экономика*. 2017;2(26):35–52. https://doi.org/10.25283/2223-4594-2017-2-35-52

    Panin G.N., Dianskii N.A., Solomonova I.V., Gusev A.V., Vyruchalkina T.Iu. Assessment of climate change in the Arctic in the 21st century based on a combined forecast scenario. *Arctic: ecology and economics*. 2017;2(26):35–52. (In Russ.). https://doi.org/10.25283/2223-4594-2017-2-35-52

19. Prokhorova U., Alekseev G., Vyazilova A. Regional and remote influence on the sea ice in the Kara Sea. *J. Mar. Sci. Eng*. 2023;11(2):254. https://doi.org/10.3390/jmse11020254

20. Тимофеева А.Б., Шаратунова М.В., Прохорова У.В. Оценка многолетней изменчивости толщины припая в морях Российской Арктики по данным полярных станций. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2023;69(3):310–330. https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-3-310-330

    Timofeeva A.B., Sharatunova M.V., Prokhorova U.V. Estimation of fast ice thickness multiyear variability in the Russian Arctic seas according to polar stations data. *Arctic and Antarctic Research*. 2023;69(3):310–330. (In Russ.). https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-3-310-330

21. Алексеев Г.В. Арктическое измерение глобального потепления. *Лед и Снег*. 2014;54(2):53–68. https://doi.org/10.15356/2076-6734-2014-2-53-68

    Alekseev G.V. Arctic dimension of global warming. *Ice and Snow*. 2014;54(2):53–68. (In Russ.). https://doi.org/10.15356/2076-6734-2014-2-53-68

22. Алексеев Г.В., Харланенкова Н.Е., Вязилова А.Е. Арктическое усиление: роль междуширотного обмена в атмосфере. *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2023;9(1):13–32. https://doi.org/10.21513/2410–8758–2023–1–13–32

    Alekseev G.V., Kharlanenkova N.E., Viazilova A.E. Arctic intensification: the role of interlatitudinal exchange in the atmosphere. *Fundamental and Applied Climatology*. 2023;9(1):13–32. (In Russ.). https://doi.org/10.21513/2410–8758–2023–1–13–32

ГИДРОЛОГИЯ СУШИ И ГИДРОХИМИЯ
HYDROLOGY OF LAND AND HYDROCHEMISTRY

Оригинальная статья / Original paper
https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-1-46-70
УДК 556.55

Адаптация озер полуострова Файлдс (о. Кинг Джордж, Восточная Антарктида) к климатическим изменениям и антропогенному воздействию

И.В. Фёдорова[1]✉*, Е.С. Чернова[1], С.Ю. Евграфова[2], В.К. Кадуцкий[2], А.С. Прокушкин[2], И.Е. Сидорина[1]

[1] *Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*

[2] *Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр» СО РАН, Красноярск, Россия*

✉i.fedorova@botany.am

ИВФ, 0000-0001-5370-427X; ЕСЧ, 0000-0003-4463-4024; СЮЕ, 0000-0002-2758-7361; ВКК, 0000-0002-8296-6882; АСП, 0000-0001-8721-2142; ИЕС, 0000-0002-6373-0639

Аннотация. В последнее время возрастает нагрузка на оазисы Антарктиды, что ведет к увеличению нагрузки на водные экосистемы озер и водотоков оазисов на фоне потепления климата и таяния краевой части ледника. В данной работе приведены результаты изучения водных экосистем озер полуострова Файлдс (о. Кинг Джордж) в летний период в январе–феврале 2020 г. Помимо результатов гидрологических и гидрохимических исследований представлены данные измерений самоочищающей способности репрезентативных водоемов оазиса и потоков парниковых газов с поверхности озер. Наиболее полноводными являются водотоки, вытекающие с ледника. Озера имеют чаще всего нейтральную реакцию среды; хорошо аэрированы; концентрация биогенных элементов в воде имеет значительные амплитуды; большинство озер по своему гидрохимическому составу относятся к хлоридно-натриевым водам II типа. Оценка самоочищающей способности озер показала способность водоемов в целом справляться с внешними (природными) нагрузками на экосистемы, но не во всех случаях. Отмечается эвтрофирование озер и долин ручьев. В большинстве водотоков и водоемов происходит поглощение углекислого газа (CO_2), в некоторых также метана (CH_4). Однако для CH_4 в основном характерна эмиссия с поверхности водоемов. Полученные результаты позволяют судить об определенной устойчивости озер к климатическим изменениям, но уже можно говорить о том, что пресноводные экосистемы оазиса испытывают значительную антропогенную нагрузку.

* Текущий адрес*: Институт Ботаники им. А.Л. Тахтаджяна Национальной академии наук Республики Армении, Ереван, Армения, i.fedorova@botany.am*

Ключевые слова: антарктические оазисы, гидрология, гидрохимия, озера, о. Кинг Джордж, парниковые газы, полуостров Файлдс

Для цитирования: Фёдорова И.В., Чернова Е.С., Евграфова С.Ю., Кадуцкий В.К., Прокушкин А.С., Сидорина И.Е. Адаптация озер полуострова Файлдс (о. Кинг Джордж, Восточная Антарктида) к климатическим изменениям и антропогенному воздействию. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2024;70(1): 46–70. https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-1-46-70

Поступила 23.10.2023 **После переработки 10.01.2024** **Принята 08.02.2024**

Adaptation of Fildes Peninsula Lakes (King George Island, East Antarctica) to climate change and anthropogenic impacts

Irina V. Fedorova[1]✉*, Elizaveta S. Chernova[1], Svetlana Yu. Evgrafova[2], Valeriy K. Kadutzkii[2], Anatoly S. Prokushkin[2], Inessa E. Sidorina[1]

[1] *Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia*

[2] *Sukachev Institute of Forest Siberian Branch of Russian Academia of Sciences, Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russia*

✉i.fedorova@botany.am

IVF, 0000-0001-5370-427X; ESC, 0000-0003-4463-4024; SYE, 0000-0002-2758-7361; VKK, 0000-0002-8296-6882; ASP, 0000-0001-8721-2142; IES, 0000-0002-6373-0639

Abstract. The load on the Antarctic oases has been recently increasing, with intensive research carried out by various countries and ecological tourism developing. This leads to an increase in the impact on the aquatic ecosystems of the lakes and streams in addition to the warming climate and glacier melting. This paper presents findings from a study of the Fildes Peninsula (King George Island) lakes' aquatic ecosystems in the summer period of January–February 2020. In addition to results of hydrological and hydrochemical studies, the paper provides data from measurements of the self-cleaning ability of representative oasis lakes, as well as greenhouse gas fluxes from the lakes surface. The water level of the streams decreased 5 times over the summer season, and the water discharge — 10 times. The streams flowing from the glacier have the fullest water. The lakes have a neutral reaction, sometimes weakly alkaline; they are well aerated: the average value of dissolved oxygen in water is 85 %, occasionally supersaturation of up to 137% was observed. The concentration of nutrients in the water has amplitudes that are considerable for Antarctic oases lakes. A significant correlation can only be observed between nitrates and phosphates, and also between the water turbidity and the nutrients' concentration. Maximum turbidity is observed in lakes with abundant content of bacterial mats. Most of the lakes have hydrochemical type II sodium chloride waters. The assessment of the lake self-cleaning ability using the ratio of destruction and organic matter production showed the general ability of ecosystems to cope with external (natural) pressures on ecosystems, but not in all cases. Eutrophication of the lakes and stream valleys is also noted. Carbon dioxide (CO_2) absorption was observed in most of the streams and lakes, in some of them — methane (CH_4) absorption as well. However, CH_4 is generally emitted from the surface of the lakes. The largest values are recorded for small lakes located on glacial moraines and in places where ornithosoils are present. The agreement of the findings from the hydroecological studies of the Fildes peninsula lakes with those presented earlier by other authors makes it possible to conclude that there is a certain resistance of the lakes to climatic changes, but one can already talk about a significant anthropogenic impact on the freshwater oasis ecosystems.

* Present Address: *Institute of Botany after A.L. Takhtajyan National Academia of Sciences of the Republic of Armenia, Erevan, Armenia, i.fedorova@botany.am*

Keywords: Antarctic oases, Fildes peninsula, greenhouse gases, hydrochemistry, hydrology, King George Island, lakes

For citation: Fedorova I.V., Chernova E.S., Evgrafova S.Yu., Kadutzkii V.K., Prokushkin A.S., Sidorina I.E. Adaptation of Fildes Peninsula Lakes (King George Island, East Antarctica) to climate change and anthropogenic impacts. *Arctic and Antarctic Research*. 2024;70(1):46–70. (In Russ.). https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-1-46-70

Received 23.10.2023 **Revised 10.01.2024** **Accepted 08.02.2024**

Введение

К объектам исследования относятся озера полуострова Файлдс, который является юго-западной оконечностью острова Кинг Джордж — крупнейшего острова в архипелаге Южных Шетландских островов (Западная Антарктика). В работе [1] отмечено, что Антарктический полуостров является ключевым для рассмотрения потепления климата в Южном полушарии. Отмечается, что на нем, возможно, происходит наиболее значительное потепление. На острове Кинг Джордж ранее хорошо было изучено порядка шестидесяти озер [2]. Однако на полуострове Файлдс в период интенсивного таяния более 135 озер и небольших водоемов, которые были исследованы во время летнего сезона 65-й РАЭ авторами данной работы. Многие водоемы оазиса временные, наполняющиеся в летний сезон талыми ледниковыми и снежниковыми водами. Также распространенным типом водного питания являются атмосферные осадки. Происхождение озерных котловин малых водоемов по большей части связано с экзарационной деятельностью ледника. Небольшие котловины замкнуты и имеют площадь до 0,5 км^2. На территории полуострова находятся также четыре крупных озера (Китеж, Длинное, Слаломное, Глубокое). Первые три имеют тектонико-экзарационное происхождение. Озеро Глубокое предположительно является кратером вулкана [3]. Все озера в зимний период покрыты льдом, мелкие перемерзают. Вскрытие ото льда происходит в январе-феврале, однако крупные озера и водоемы, расположенные в горах, в зависимости от метеоусловий отдельного года, могут не открыться ото льда даже в летний сезон. Наличие на полуострове ледника и снежников определяет характер весеннего снеготаяния и дружности половодья: формируются многочисленные ручьи, которые питают озера и образовывают сравнительно полноводные реки, впадающие в море. К осени таяние прекращается, многие мелкие водоемы пересыхают.

Описание озер антарктических оазисов, ландшафтов, биоразнообразия и факторов, влияющих на формирование экосистем, подробно дано в обзорах [4–8] и др. Геохимический анализ озер рассматривался в работах [2, 9, 10] и др. В работе [9] представлены гидрохимические сведения относительно только двенадцати ранее хорошо изученных озер оазисов Холмы Ларсеманн и п-ова Файлдс. Более детальные, обширные и близкие к нашему исследованию работы были выполнены чешскими исследователями в 2013 г. [7] на 47 озерах островов Вега и Джеймс Росс Антарктического полуострова. Авторами выделено 6 типов озер по их генезису, представлены гидрохимические характеристики каждого типа и отдельно взятых озер. Белорусскими учеными [11] выполнены измерения гидрохимических параметров озер оазиса Вечерний в Восточной Антарктиде. Пробы из 10 озер и 13 временных водоемов отбирались в период с 2012 по 2019 г. в ходе сезонных работ БАЭ. Гидрометриче-

ские наблюдения на временных водотоках полуострова были выполнены в период января–марта 2012 г. [12]. Палеогеографические исследования оазиса представлены в отчете М.В. Дорожкиной и Л.М. Саватюгина[1], С.Р. Веркулича [13]. Геохимический и изотопный состав верхнего слоя донных отложений четырех прогляциальных озер и перегляциального оз. Китеж п-ова Файлдс хорошо описаны в [14]. Полученные геохимические результаты отношения углерода и азота (C/N, TOC, TN) и липидные биомаркеры (Pr/Ph — Pristane/Phytaneratio) в верхнем слое донных отложений позволили авторам составить палеореконструкцию гидрохимических условий, при которых формировались озера, показав изменение окислительно-восстановительного потенциала, наличие гипоксии в одних озерах и хорошее перемешивание и кислородные условия — в других, что весьма важно для водных экосистем и в настоящее время. Также авторами на основе содержания стабильных изотопов ^{13}C отмечается возможное влияние торфяных останков растений на липидный состав компонентов донных отложений и привнос морских аэрозолей для формирования геохимии осадков.

В рамках 65-й РАЭ в период с 18 января по 24 февраля 2020 г. на водных объектах острова Кинг Джордж проводились гидрохимические и гидробиологические наблюдения, являющиеся продолжением геоэкологических исследований водных объектов оазиса и наземных ландшафтов, выполнявшихся в ходе предыдущих экспедиций. Ранее, в период работ 58-й и 59-й РАЭ, на территории оазиса были изучены 29 озер, 3 водотока и ледник Беллинсгаузена [2]. Особенностью работы 65-й РАЭ являлся дополнительный акцент на гидрологических и гидрохимических исследованиях — изучение потоков парниковых газов с поверхности водоемов. Исследования такого рода позволяют получить информацию о текущем состоянии водных и наземных ландшафтов, их качественных и количественных характеристиках, а также спрогнозировать дальнейшее развитие. Во время полевых работ был осуществлен комплекс гидроэкологических исследований, включающий в себя как проведение гидрохимических экспресс-анализов, сбор натурных материалов (проб воды, компонентов биоты, донных отложений), так и последующую камеральную обработку.

В [15] отмечается, что, согласно работам различных авторов, в пресноводных водоемах приморских антарктических территорий (Южных Шетландских островов) найдено 69 зоопланктонных организмов, включая мезо- и макрозоопланктон, из которых 52 таксона — это Rotifera (коловратки). Однако для небольших наскальных прудов биоразнообразие значительно меньше. Так, для Аргентинского острова было отмечено всего 11 таксонов. Подробное описание гидробионтов озер антарктических оазисов дано в работах иностранных авторов для других оазисов [5, 16, 17], а для п-ова Файлдс в [18] были идентифицированы 53 вида водорослей, относящихся к 5 отделам, 7 классам, 17 отрядам, 28 семействам и 36 родам. Наибольшее число идентифицированных видов принадлежит к цианобактериям (37 видов, 70 % от общей численности). Распространенные виды характеризуются как бентические, планктонно-бентические и почвенные обитатели. Для водоемов выделены водоросли стоячих водоемов и текущих вод (водотоков). Во время летнего сезона 2006/07 г.

[1] *Дорожкина М.В.*, *Саватюгин Л.М.* Научно-технический отчет по программе «Исследования по палеогеографии и палинологии на станции Беллинсгаузен (остров Кинг Джордж, Западная Антарктида) в период зимовочных работ 56-й РАЭ» // Фонды ААНИИ, Санкт-Петербург. 2012. 92 с.

для оз. Китеж основным видом зоопланктона назван пресноводный вид рачков копепод — *Pseudoboeckella poppei* (Copepoda, Calanoida) [19]; помимо этого, были отмечены бранхиоподы *Branchinecta sp.*, а также придонные кладоцеры *Macrothrix sp*.

Измерение потоков парниковых газов (CO_2 и CH_4) с поверхности выполнено для такого количества озер п-ова Файлдс впервые. Ранее потоки газов изучались с поверхности почв, с наземных ландшафтов [20]. В [21] авторы рассматривали активность и биоразнообразие аэробных метанотрофов в донных отложениях пяти озер о. Кинг Джордж. В работе [22] рассмотрено содержание растворенных парниковых газов в воде, донных отложениях озера Китеж в течение года, эмиссия CO_2 и CH_4 с его поверхности в летний период. Для Китежа представлены пространственное распределение CO_2 и CH_4 по глубине озера, а также эмиссия газов с его поверхности, где отмечается поглощение CO_2 и выделение CH_4 в конце весеннего периода и начале осеннего.

Большинство перечисленных выше работ либо охватывают аналогичные исследования других антарктических территорий, либо, чаще всего, основаны на изучении малого количества водных экосистем или отдельных процессов, в них происходящих.

В данной работе, целью которой являлась оценка гидроэкологического состояния озер полуострова Файлдс острова Кинг Джордж (или о. Ватерлоо) в летний период 2020 г., представлены результаты исследования большого количества водоемов, что позволило составить представление о пространственном распределении параметров озер по территории оазиса и выявить закономерности и специфику тех или иных процессов, происходящих на полуострове.

Материалы и методы

Полуостров Файлдс представляет собой свободный ото льда участок суши, на котором находится множество малых и крупных водоемов. Остальная часть о. Кинг Джордж покрыта ледниковым куполом Беллинсгаузена.

Остров сложен вулканическими горными породами (базальтами, туфами и андезитами). Рельеф острова холмистый с абсолютными высотами 150–160 м над уровнем моря. В ряде мест остров обрамлен морскими террасами. Климат острова более мягкий по сравнению с оазисами. Среднегодовая температура воздуха составляет –1,6 °С. Среднегодовая температура земной поверхности –1 °С. Климат более влажный. В среднем относительная влажность составляет 84 %. За год выпадает более 500 мм осадков. На острове Кинг Джордж довольно высокая облачность. Среднегодовая общая облачность составляет 9 баллов. Среднегодовая скорость ветра 7 м/с. Для острова характерны примитивные криогенно-структурные почвы с незначительным содержанием гумуса. Почвы являются кислыми и слабозасоленными. Существенное влияние на почвообразовательные процессы оказывает органическое вещество, продуцируемое животными. В оазисе были обнаружены гнездовья трех видов пингвинов (пингвин Адели, антарктический пингвин, ослиный пингвин), буревестника, поморника, капского голубя [3, 23].

На озерах оазиса измерялись гидрофизические и гидрохимические параметры: pH, температура воды, электропроводность, содержание растворенного кислорода. Всего изучено 132 озера и временных водоема (рис. 1). Названия озер в статье представлены из газетира [24] — для крупных озер и авторские — для малых водоемов, с указанием для них географических координат для возможности сравнения результатов с другими исследованиями. В большинстве озер отбор проб воды и ги-

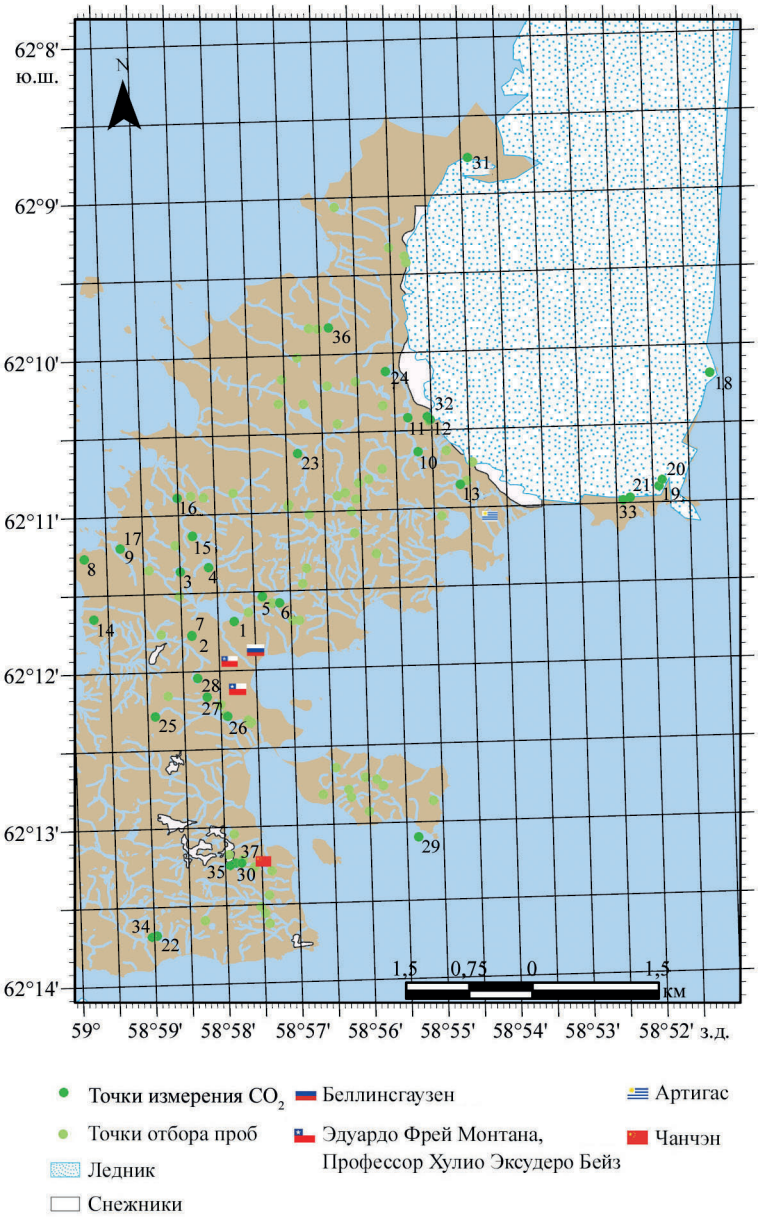

Рис. 1. Район работ и точки отбора проб на п-ове Файлдс, о. Кинг Джордж, Южные Шетландские острова.

Номерами обозначены озера, где брались пробы CO_2

Fig. 1. The area studied and points of sampling on the Fildes Peninsula, King George Island (South Shetland Islands).

The numbers indicate the lakes where CO_2 samples were taken

дрохимические экспресс-анализы проводились разово, однако на некоторых водоемах были организованы повторные наблюдения. Измерения проводились портативными электрохимическими приборами фирмы “OHAUS”: кислородомером Starter 300D, pH-метром с термометром ST20 и кондуктометром с термометром ST20C-B.

Анализ содержания биогенных элементов был выполнен дважды — в полевой лаборатории (анализы первого дня) и в Санкт-Петербурге в Лаборатории им. Отто Шмидта Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ОШЛ ААНИИ) на анализаторе биогенных элементов SKALAR SunPlusSystem. На фотометре «Эксперт-003» непосредственно в полевой лаборатории научной станции были проанализированы пробы воды на содержание ортофосфатов и нитратов, цветность и мутность. Далее часть отобранных и замороженных проб была доставлена в ААНИИ, где выполнялся анализ концентраций кремния, фосфатов, аммония и нитратов с нитритами колориметрическим методом.

Анализ содержания главных ионов в воде озер проводился в Ресурсном центре Санкт-Петербургского государственного университета (СПбГУ) «Методы анализа состава вещества» методом жидкостной хроматографии на приборе Стайер А.

Самоочищающая способность водных экосистем определялась с помощью отношения деструкции (D) органического вещества к валовой первичной продукции ($P_{вал}$), или $D/P_{вал}$ [25]. Эксперименты по определению $D/P_{вал}$ проводились на двух небольших озерах водосбора оз. Китеж и устья ручья Взлетный, недалеко от аэродрома, — на оз. Метановое (62°11'20,9" ю. ш., 58°58'55,4" з. д.) и оз. Красных водорослей (62°11'16,1" ю. ш., 58°59'08,5" з. д.). На озерах Метановое и Красных водорослей были выполнены измерения на основе скляночного метода в кислородной модификации [26]. Время экспозиции выбиралось довольно большое (48 часов) в связи с отсутствием явно выраженного внутрисуточного хода изменения параметров (полярный день во время антарктического лета). Далее рассчитывалось $D/P_{вал}$ отношение. При $D/P_{вал}>1$ в озере преобладает разложение органического вещества, и экосистема способна к самоочищению. При $D/P_{вал} < 1$ в экосистеме активно происходит рост первичной продукции, не компенсируемый разложением органического вещества, и, значит, данная система в большей степени склонна к эвтрофированию. Безусловно, $D/P_{вал}$ отношение может быть одинаковым при малых и больших значениях продукции и деструкции, однако данный метод позволяет в целом говорить о способности системы к самоочищению, что важно для оценки экологического состояния озер оазиса, на котором постоянно растет антропогенное воздействие в связи с развитием экологического туризма.

Были проведены наблюдения за гидрологическим режимом близлежащих к станции Беллинсгаузена водотоков в летний период. На вытекающем из оз. Китеж ручье возобновлены измерения уровня и расходов воды. В течение всего периода уровень воды измерялся ежесуточно, скорость течения и расход воды — раз в 10 дней. В качестве водомерного створа использовался водослив из подпруженного для водохозяйственных целей озера рядом со станцией. Измерения скоростей течения выполнялись методом поверхностных поплавков. Расчеты расходов воды проводились согласно Наставлению гидрометеорологическим станциям и постам аналитическим методом[2]. На других водотоках оазиса гидрометрические наблюде-

[2] Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 2. Ч. 2: Гидрологические наблюдения на постах. Л.: Гидрометеоиздат, 1975.

ния выполнялись разово, в основном на двух или трех створах в различных частях водотока для выявления нарастания стока ручьев по их длине.

Оценку потоков метана с поверхности водного объекта в полевых условиях проводили с использованием анализатора концентрации метана в воздухе SPD203 фирмы Sanpometer (высокоточного течеискателя) и плавающей камеры объемом 6 дм^3. Датчик анализатора помещали в отверстие в верхней части камеры и регистрировали изменение концентрации метана в течение 120 секунд. На каждом водном объекте проводили от 3 до 6 измерений, в зависимости от его размеров и сходимости результатов замеров. Измерение потоков CO_2 выполняли на 37 озерах оазиса (см. рис. 1) методом плавающих камер с помощью ручного измерителя уровня содержания CO_2 Vaisala CARBOCAP GM70 с портативным ИК-сенсором Vaisala GMP222 и логгером MI70. Растворенный CO_2 измеряли портативным ИК-сенсором Vaisala CARBOCAP. Одновременно с потоками парниковых газов измерялись метеопараметры: температура воздуха, температура воды (для водных объектов), атмосферное давление. Скорость ветра не учитывалась.

Для всех гидрохимических параметров проведен статистический анализ. Были посчитаны стандартные величины: коэффициент вариации (Cv), коэффициент асимметрии (Cs), дисперсия, амплитуда, среднее значение, медиана, мода, стандартное квадратическое отклонение.

Результаты

Гидрологические работы на водотоках оазиса

Уровень воды ручья, вытекающего из оз. Китеж, изменялся в течение сезона в 5 раз (от 2 см до 11,5 см), что связано с выпадавшими за период наблюдений осадками. Ход уровня воды и измеренные расходы представлены на рис. 2. Максимальный расход воды составлял 2993 л/с (или 3 м^3/с), минимальный был в 10 раз меньше. Максимальная средняя скорость течения ручья — 0,96 м/с — отмечалась выше подпруды, а минимальная — 0,37 м/с — ниже, на водосливе. Нужно отметить, что в связи с использованием воды ручья на нужды станции расход воды ниже подпруды может сократиться более чем в 10 раз.

Гидрометрические работы в течение сезона были выполнены на нескольких ручьях, расположенных между российской и уругвайской станциями (см. рис. 1). Ниже представлено описание обследованных водотоков, а в табл. 1 — основные гидрометрические и гидрохимические характеристики.

Разовое обследование водотоков оазиса показало, что наиболее полноводными являются водотоки, текущие непосредственно с купола ледника Беллинсгаузена. Так, расход воды реки в районе уругвайской научной станции составлял 03.02.2020 0,56 м^3/с, максимальная скорость потока была 1,17 м/с, площадь водного сечения при измерении равнялась 1,35 м^2 при средней глубине потока 0,52 м.

Ручей 1 (62°11'29,9" ю. ш., 58°56'48,4' з. д., измерения выполнены 08.02.2020). Ручей берет свое начало из снежника и впадает в оз. Мираж. Ручей имеет каменистое дно, но есть песок и немного ила. На дне — водоросли. Русло ручья расширяется, на всем протяжении оно такое же каменистое. В ручей притекают небольшие потоки со склонов, где находятся маленькие снежники. Продольный профиль ручья не выположен и имеет различные уклоны. В верхнем течении профиль имеет небольшой уклон, средняя часть — с более значимым уклоном, а нижняя треть ручья — наи-

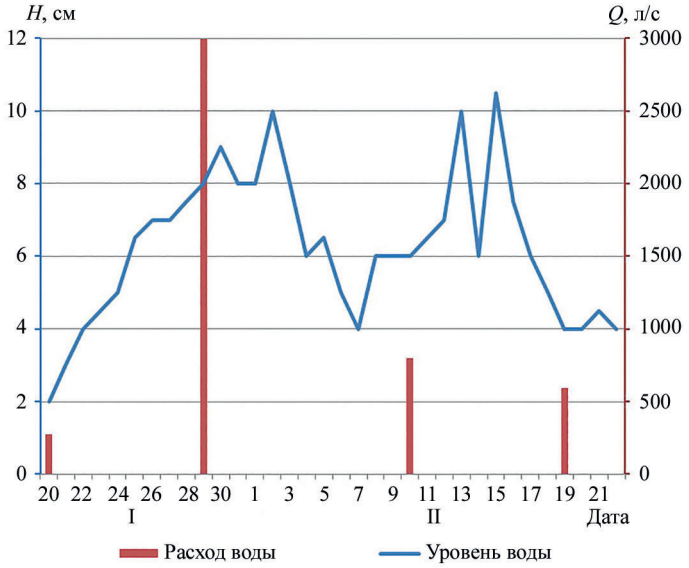

Рис. 2. Ход уровня (*H*) и расход воды (*Q*) ручья, вытекающего из оз. Китеж в летний сезон 65-й РАЭ (январь–февраль 2020 г.)

Fig. 2. Water level (*H*) and discharge (*Q*) of the stream outflowing from Kitehz lake in the summer season 65 RAE (January–February 2020)

больший уклон. Общий перепад высот между истоком и устьем составляет 9 м. Длина ручья 167 м. Ручей впадает в оз. Мираж, образуя дельту. До вершины дельты от края озера 3 м. Вода в дельте распластывается. На дне ручья наблюдаются бактериальные маты и большое количество зеленых водорослей. Для измерения в верхнем течении ручья выбран прямолинейный участок. Дно — каменисто-песчаное. Ширина верхнего створа (62°11'30,0" ю. ш., 58°56'49,0" з. д.) 0,65 м. Средняя глубина — 1,9 см. Расход воды измерялся поверхностными поплавками и равен 0,9 л/с. Средняя скорость течения — 0,11 м/с. Концентрация измеренного на створе растворенного кислорода составляет 12,15 мг/л, или 104,2 % насыщения при температуре воды 8,1 °С; электропроводность — 65 мкСм/см. Нижний створ (62°11'31,1'' ю. ш., 58°56'58,7'' з. д.) выбран в месте до распластывания течения, с большей шириной русла, однако оно заполнено не полностью. Скорость течения та же, что и в верхнем течении, — 0,11 м/с. Ширина створа 0,95 м, средняя глубина — 2,2 см. Расход воды 0,019 м^3/с. Расход в нижнем течении немного больше за счет притока с водосбора ручья на участке между верхним и нижним створами. Концентрация измеренного на створе растворенного кислорода составляет 8,76 мг/л, или 77,4 % насыщения при температуре воды 9,3°С; электропроводность — 73 мкСм/см.

Ручей 2 (62°11'35,1" ю. ш., 58°57'15,9" з. д., измерения выполнены 08.02.2020). Ручей вытекает из оз. Мираж и впадает в оз. Среднее. Ширина русла в верхнем течении составляет примерно 1,5 м, однако по мере продвижения вниз по склону русло расширяется до 10 м. Вода течет широким и мелководным потоком. Между камней образуются струи (русловая многорукавность). В нижнем течении поток создает небольшую заводь, в которой во время полной воды формируется оз. Среднее. Озеро

Таблица 1

Основные гидрометрические и гидрохимические характеристики ручьев п-ова Файлдс (между российской и уругвайской научными станциями)

Table 1

Main hydrometrical and hydrochemical features of the streams of the Fildes peninsula (between Russian and Uruguayan research stations)

№ ручья, дата измерения	Створ	Ширина створа, м	Скорость течения, м/с	Расход воды, л/с	Средняя глубина, см	Концентрация растворенного кислорода O_2		Температура воды, °C	Электропроводность, мкСм/см
						мг/л	% насыщ.		
Ручей 1, 08.02.20	Верхний	0,65	0,11	0,9	1,9	12,15	104,2	8,1	65
	Нижний	0,95	0,11	1,9	2,2	8,76	77,4	9,3	73
Ручей 2, 08.02.20		6,00	0,11	0,9	1,9	12,15	104,2	8,1	65
Ручей 3, 15.02.20	Верхний	1,55	0,87	899	7,4	11,30	83,8	2,4	115
	Нижний	2,50	0,91	936	6,3	11,40	85,9	3,0	118
Ручей 3, 20.02.20	Нижний	2,20	0,29	384	7,2				
Река*		2,60	1,17	564000	52,0				
Ручей из оз. Китеж	Водослив в районе станции		0,96**	2993**					

Примечание. * река в районе уругвайской станции — формируется стоком с ледника; ** указаны максимальные за период наблюдений значения; створ расположен возле станции Беллинсгаузена — водослив из запруды ручья.

может сильно изменять свои размеры: если в начале наблюдений его размеры были 60 × 80 м, то через две недели, на момент измерений на ручье, оно уменьшилось примерно до 20 м в длину и 5 м в ширину. Дно ручья покрыто бактериальными матами и длинными зелеными водорослями. Длина ручья — 112 м, перепад высот — 3 м. Для гидрологических измерений в ручье выбран прямолинейный участок ближе к оз. Мираж. Вода текла несколькими струями, измерения проведены в самой крупной из них. Расход воды во второй струе, которая ответвляется выше, существенно меньше (примерно 5 % стока основного русла), поэтому в расчет не принимался. Дно — каменисто-песчаное. Ширина створа 6 м. Средняя глубина — 1,9 см. Расход воды, измеренный поверхностными поплавками, составил 0,009 м^3/с. Средняя скорость течения — 0,11 м/с. Концентрация измеренного на створе растворенного кислорода составляет 12,15 мг/л, или 104,2 % при температуре воды 8,1 °C; электропроводность — 65 мкСм/см.

Ручей 3 (62°11'14,1" ю. ш., 58°56'21,0" з. д., измерения выполнены 15.02.2020). Ручей берет свое начало из трех снежников в предгорьях большого горного массива полуострова, впадает в залив Максвелл в районе нефтебазы. Сливаются три потока, затем до средней части ручей имеет одно русло. В середине и ниже (до

каньона) в ручей впадают некоторые мелкие ручьи с водосбора, расход которых несуществен. Русло ручья на всем протяжении каменистое, водорослей нет. Уклон ручья значительный. Русло ручья до конца не выработано, однако существует уже давно — в ручье есть каньоны. Наблюдаемые русловые формы — прямолинейное течение (верхняя часть русла), ограниченное меандрирование (средняя часть 62°11'24,0"ю. ш., 58°56'21,2" з. д.), пойменная многорукавность, каньон (нижнее течение) и устьевая область (эстуарий, частично перекрытый от моря прибереговым валом, 62°11'38,7'' ю. ш., 58°56'07,0" з. д.). Общая длина ручья — 785 м. Превышение истока ручья над устьем — 23 м.

Для измерения в верхнем течении ручья (62°11'17,0" ю. ш., 58°56'20,0" з. д.) выбрано место после слияния трех ручьев со снежников. Участок прямолинейный. Ширина верхнего створа — 1,55 м, средняя глубина — 7,4 см. Расход воды, измеренный поверхностными поплавками, равен 0,899 м^3/с. Средняя скорость течения — 0,87 м/с. Концентрация измеренного на створе растворенного кислорода составляет 11,3 мг/л, или 83,8 % насыщения при температуре воды 2,4 °С; электропроводность — 115 мкСм/см.

Нижний створ (62°11'24,0" ю. ш., 58°56'21,2" з. д.) выбран в месте после пойменной многорукавности, до каньона. Русло одно, скорость течения значительная и составляет 0,91 м/с. Ширина створа — 2,5 м, средняя глубина — 6,3 см. Расход воды 0,936 м^3/с. Расход в нижнем течении немного больше за счет притока с водосбора ручья. Концентрация измеренного на створе растворенного кислорода составляет 11,4 мг/л, или 85,9 % при температуре воды 3°С; электропроводность — 118 мкСм/см. Повторное измерение в нижнем створе ручья 20.02.2020 показало уменьшение скорости течения по сравнению с предыдущим измерением 15.02.2020 до 0,29 м/с. Ширина створа 2,2 м, средняя глубина — 7,2 см. Расход воды составил 0,384 м^3/с.

Измерение гидрофизических и гидрохимических параметров на малых ручьях оазиса, выполненное в феврале 2020 г., показывает довольно хорошее насыщение растворенным кислородом — до 77 % и выше, электропроводность составляет от 65 до 118 мкСм/см.

Результаты гидрохимических наблюдений

Температура воды. Температура в озерах в период отбора проб варьировала от озера к озеру. Коэффициент вариации составляет 41 % и показывает неоднородность данных при большой амплитуде значений, что неудивительно для летнего сезона.

В среднем температура озер составляла 7,5 °С. При этом максимальная температура 15,9 °С отмечалась в небольшом водоеме на о. Ардли (62°12'40,2" ю. ш., 58°56'30,2" з. д.), также значение 15,8 °С имел временный водоем в другой части оазиса — недалеко от старой бразильской станции (62°10'19,0" ю. ш., 58°57'05,4'' з. д.), что, безусловно, связано с метеоусловиями данного времени года. Минимальная температура воды характерна для криоконитов (0,1 °С) на леднике и ручьях, с него стекающих (0,2 °С), а также приледниковых водоемах, например, 3 °С в оз. Подледное (62°10'58,3" ю. ш., 58°52'19,7" з. д.). Такое различие температур связано не только с близостью ледника, но и с глубиной озер. Озеро, в котором наблюдалась температура 15,9 °С, мелкое, не глубже двадцати сантиметров. Именно из-за небольшой глубины и нахождения в озере темно-бурых матов водорослей оно смогло так сильно прогреться.

Водородный показатель (pH). Крайне однородны полученные показатели pH, коэффициент вариации составляет всего 8 %. По значению водородного показателя выделяются нейтральные, слабощелочные и сильнощелочные озера. Преобладают озера с нейтральной реакцией среды. Максимальное за рассматриваемый период значение водородного показателя составило 10,05, среднее — 7,56. Столь высокие показатели pH характерны для лагунных, слабосоленых, озер о. Кинг Джордж.

Растворенный кислород (O_2). Концентрация растворенного кислорода от озера к озеру варьирует сильно, коэффициент вариации составляет 64 %. Это связано главным образом с морфометрическими характеристиками озер, с близостью ледника и снежников, а также с динамикой водных экосистем озер и временных водоемов оазиса. В среднем концентрация O_2 составила 10,83 мг/л, максимальное содержание растворенного кислорода — 13,82 мг/л. Насыщение кислородом при этом соответствовало в среднем 85 %, максимальное значение — 137 %. Для многих озер характерно насыщение кислородом выше 100 %, что является отличительной чертой озер антарктических оазисов, поступление воды в которые обусловлено в основном талыми снежниковыми и ледниковыми водами, обогащенными растворенным кислородом.

Электропроводность. Большинство озер о. Кинг Джордж пресные, об этом свидетельствуют данные по электропроводности воды. Так, средняя электропроводность составляет 288 мкСм/см. Однако есть и соленое лагунное озеро, электропроводность которого составила 10200 мкСм/см, — неглубокое, до пятнадцати сантиметров глубиной, в него во время штормов поступает морская вода.

Содержание биогенных элементов. Концентрации биогенных элементов значительно варьируют от озера к озеру и изменяются в течение летнего периода. Для измеренных непосредственно в полевых условиях концентраций биогенных элементов в воде коэффициент вариации содержания фосфатов равен 112 %, нитратов (NO_3^-) — 355 %. Содержание фосфатов довольно высоко, в среднем — 0,92 мг/л с амплитудой от 0 мг/л до 8,04 мг/л, при этом максимальное значение в 9 раз превышает медиану. Среднее содержание нитратов составляет 0,6 мг/л при амплитуде от 0 мг/л до 11,5 мг/л. Максимальное значение концентрации нитратов в 19 раз превышает среднее значение. Измерения содержания биогенных элементов (кремния Si, фосфатов, ионов аммония (NH_4^+), суммы нитритов и нитратов (NO_2^-+NO_3^-) в лаборатории ОШЛ ААНИИ показали значительно меньшие значения. Анализ был проведен для меньшего количества проб: максимальное количество анализов для кремния составило 16 проб, а для аммония — всего 7 проб. Максимальная концентрация фосфатов в озерах равнялась 0,02 мг/л, а суммы нитратов и нитритов — 0,59 мг/л. И если значение нитратов с нитритами примерно такое же, как и среднее значение для полевых наблюдений, то содержание фосфатов отличается на два порядка. Однако в связи с тем, что возможны ошибки измерений как в полевых условиях (из-за плохой калибровки прибора), так и в ААНИИ (из-за транспортировки проб в замороженном виде и периоде их хранения более двух месяцев), в данной работе приводятся все имеющиеся результаты. Амплитуда Si изменялась от 0,01 до 2,80 мг/л при среднем измеренном значении 1,17 мг/л. Концентрации аммония варьировали от 0,01 до 0,3 мг/л при среднем значении 0,08 мг/л.

Цветность и мутность. Для озер о. Кинг Джордж п-ова Файлдс были определены такие параметры, как цветность (по шкале Хазена) и мутность. Данные по

этим параметрам варьируют значительно, коэффициент вариации для цветности составляет 195 %, для мутности — 163 %. Цветность изменялась от 0° до 420°. Максимальная цветность наблюдалась в неглубоком (максимум 15 см) озере с обильным присутствием бактериальных матов. Мутность изменялась от 0 ЕМФ до 72,6 ЕМФ, где ЕМФ — единицы мутности по формазину (примерное значение мутности, выраженной в мг/л). Максимальная мутность наблюдалась в неглубоком (20 см) озере с обильным присутствием матов.

Ионный состав воды. В ходе ионнохроматографического анализа был определен катионный (Ca^{2+}, K^{+}, Mg^{2+}, Na^{+}) и анионный (Cl^{-}, Br^{-}, F^{-}, SO_4^{-2}) состав воды некоторых озер оазиса. Среди катионов преобладающим оказался натрий Na+, максимальная концентрация которого составила 0,763 мг-экв/л, минимальная — 0,05 мг-экв/л. Максимальная концентрация калия — 0,169 мг-экв/л, минимальная — 0,004 мг-экв/л. Амплитуда значений содержания магния была 0,008–0,535 мг-экв/л, кальция — 0,003–0,69 мг-экв/л. Среди анионов преобладающим в водах изучаемых озер оказался хлорид, амплитуда значений составила 0,08–2,38 мг-экв/л. Содержание фтора изменялось от 0,001 мг-экв/л до 0,006 мг-экв/л, брома — от 0,005 до 0,02 мг-экв/л. Минимальная концентрация сульфат-иона составила 0,02 мг-экв/л, максимальная — 1,35 мг-экв/л. Концентрация гидрокарбонатов (HCO_3^{-}) оказалась ниже порога обнаружения в большинстве озер за исключением значения 0,27 мг-экв/л в лагунном малом водоеме на первой морской террасе (глубиной до 0,6 м) и 0,062 мг-экв/л в оз. Норма (62°11'21,6" ю. ш., 58°55'46,1" з. д.) напротив мыса Саффилд.

Для преобладающего числа озер суммарная концентрация кальция и магния превышает суммарную концентрацию гидрокарбонат-иона и сульфат-иона. Однако есть озера, в которых наблюдается обратная ситуация. На основании проведенных анализов все озера были типизированы по классификации О.А. Алекина (1970) [27], согласно которой большинство водоемов п-ова Файлдс относятся к хлоридно-натриевым II типа. Генетически такие водоемы имеют унаследованный гидрохимический состав — после регрессий моря поверхность оазиса составляет основной источник солей при формировании водоемов. В водах II типа суммарная концентрация гидрокарбонат-ионов и сульфат-ионов превышает суммарную концентрацию ионов кальция и магния. В хлоридно-натриевом оз. Норма (C_I^{Na}) обнаружен I тип вод, где концентрация гидрокарбонат-ионов превышает суммарную концентрацию ионов кальция и магния. Шесть озер, расположенных в лагунах и на 1-й морской террасе, имеют III тип вод. Немногочисленны водоемы сульфатного класса (оз. Подледное (S_{II}^{Na}) (62°10′58,3″ ю. ш., 58°52′19,7″ з. д.) и два мелких водоема рядом с ним, а также оз. Длинное (S_{II}^{Ca}) и кальциевой группы (оз. Географов (Cl_{II}^{Ca} Cl) и озеро (62°13′45,7″ ю. ш., 58°59′51,8″ з. д.) на юге полуострова, рядом с проливом Файлдс (Cl_{III}^{Ca}). $Cl^{Ca}{}_{III}$

Корреляционный анализ гидрохимических показателей. Все рассчитанные статистические характеристики гидрохимических параметров озер представлены в табл. 2. Для данных значений водородного показателя pH, электропроводности, нитратов, фосфатов, мутности, цветности мода и медиана больше среднего значения, для температуры и растворенного кислорода, наоборот, — среднее значение превышает моду и медиану. Это говорит о том, что данные не подчиняются нормальному закону распределения. Все ряды данных гидрохимических параметров, кроме насыщенности воды растворенным кислородом, имеют положительную асимметрию.

Таблица 2

Статистические параметры гидрохимических показателей озер полуострова Файлдс

Table 2

Statistical parameters of the hydrochemical characters of the Fildes Peninsula lakes

Статистический параметр	pH	Температура воды, °C	Электропроводность, мкСм/см	Растворенный кислород O_2, мг/л	Растворенный кислород O_2, %	Нитраты, мг/л	Фосфаты, мг/л	Цветность, град.	Мутность, ЕМФ
Среднее значение	7,56	7,51	288,5	10,83	85,63	0,61	0,93	25,97	6,5
Медиана	7,40	7,10	166,0	10,67	90,40	0,00	0,78	9,87	3,4
Мода	7,37	8,60	112,0	12,10	90,50	0,00	0,00	0,00	0,00
Max	10,05	15,90	10200,0	13,82	137,20	11,50	8,04	420,00	72,6
Min	6,47	0,10	0,0	6,05	9,62	0,00	0,00	0,00	0,00
Амплитуда	3,58	15,80	10200,0	7,77	127,58	11,50	8,04	420,00	72,6
Дисперсия	0,40	9,40	790843,4	47,59	442,94	4,65	1,09	2569	111,6
Стандартное отклонение	0,63	3,07	889,3	6,90	21,05	2,16	1,04	50,68	10,6
Cv, %	8	41	308,0	64	25	355	112	195	163,0
Cs	1,45	0,57	10,8	9,95	–0,79	4,18	3,36	5,01	3,9

Таблица 3

Корреляционная матрица гидрохимических параметров водоемов

Table 3

Correlation matrix of the hydrochemical parameters of the lakes

Параметр	Электропроводность	Водородный показатель pH	Растворенный кислород O_2	Нитраты	Фосфаты	Мутность	Цветность
Электропроводность	**1**	0,21	0,00	0,15	0,03	0,03	–0,03
Водородный показатель pH	0,21	**1**	–0,12	0,30	0,01	0,03	0,05
Растворенный кислород O_2	0,00	–0,12	**1**	0,17	–0,10	–0,05	0,11
Нитраты	0,15	0,30	0,17	**1**	0,46	0,71	–0,04
Фосфаты	0,03	0,01	–0,10	0,46	**1**	0,08	0,38
Температура воды	0,05	0,10	0,12	–0,06	0,21	–0,10	0,02

Расчет парной корреляции между гидрохимическими параметрами показал отсутствие значимой связи между нитратами и водородным показателем (кислотностью) (r = 0,30), наличие сильной прямой связи между нитратами и мутностью воды (r = 0,71), умеренной прямой связи между фосфатами и цветностью воды (r = 0,38), а также между фосфатами и нитратами (r = 0,46). Корреляционная матрица гидрохимических параметров, определенных в полевых условиях, посчитанная для 132 постоянных и временных озер оазиса, представлена в табл. 3.

Гидроэкологические исследования

Для определения гидроэкологического состояния озер полуострова использованы сведения о биоте, продукционно-деструкционных процессах и значения концентраций биогенных элементов. Водоемы п-ова Файлдс отличаются богатым биоразнообразием по сравнению с другими антарктическими оазисами. На рис. 3 представлены основные виды водорослей и бактериальные маты, встречаю-

Рис. 3. Различные виды водорослей в водоемах п-ова Файлдс

Fig. 3. Different species of algae of Fildes Peninsula aquatic objects

Рис. 4. Небольшое озеро в районе залива Коллинз с наличием большого количества красных водорослей и заболачиванием водосбора на фоне края ледникового купола

Fig. 4. A small lake in the Collins Bay area with large amounts of red algae and waterlogged catchment against the edge of the glacial cape

щиеся в озерах полуострова. Многие мелкие водные объекты, несмотря на незначительные размеры до 2 м^2, также имеют различные виды фито- и зоопланктона, невзирая на длительное промерзание зимой. Это также связано и с высоким содержанием в воде биогенных элементов из-за интенсивного поступления веществ с водосбора в летний период и активным испарением воды. Это способствует не только развитию гидробионтов, но и естественному эвтрофированию озер. Нужно также отметить, что многие поймы ручьев и озер заболачиваются, формируются торф и моховые ковры (рис. 4). Мощность торфа на водосборах озер и ручьев не превышает 30 см, однако наличие развитой наземной растительности подтверждает потепление климата (увеличение температуры воздуха и количества осадков, в том числе жидких) полуострова.

На леднике также были отмечены красные водоросли. Чаще всего такой цвет принадлежит зеленым водорослям *Chlamydomonas nivalis* и *Chlorosphaera antarctica*, которые аккумулируют фотозащитные красные эфиры [25].

Самоочищающая способность водоемов. Для исследования самоочищающей способности водных экосистем водоемов применялось $D/P_{вал}$ отношение. В табл. 4 представлены результаты определения $D/P_{вал}$ отношения. Для озера Метановое повторные измерения показали преобладание в начале февраля 2020 г. деструкции органического вещества над валовой первичной продукцией, что говорит о хорошей самоочищающей способности. А для озера Красных водорослей к концу февраля неравенство изменило знак на противоположный ($D/P_{вал} < 1$), указывая на наличие процессов эвтрофирования. Амплитуда значений $D/P_{вал}$ изменялась от 0,69 до 44, т. е. была весьма значительной, свидетельствуя о неоднозначности продукционно-деструкционных процессов в озерах, но все-таки демонстрируя возможность озерных экосистем к самоочищению.

Таблица 4

Показатели деструкции и продукции в озерах Метановое и Красных водорослей

Table 4

Parameters of decomposition and production in lakes “Metanovoye” and “Red Algae”

Озеро	Дата измерения	Деструкция D, мгС/л в сут	Продукция $P_{вал}$, мгС/л в сут	$D/P_{вал}$	Преобладающий процесс
Метановое	06.02.20–08.02.20	0,064	0,002	44	D/P>1 Самоочищение
Красных водорослей	08.02.20–10.02.20	0,03	0,009	3,4	D/P>1 Самоочищение
	12.02.20–14.02.20	0,06	0,023	2,61	D/P>1 Самоочищение
	14.02.20–16.02.20	0,049	0,042	1,17	D/P>1 Самоочищение
	16.02.20–19.02.20	0,006	0,008	0,69	D/P<1 Эвтрофирование

Потоки парниковых газов с поверхности водоемов

Поток углекислого газа. CO_2 озер в течение летнего сезона немного возрастал с середины января до конца февраля (рис. 5), что связано, скорее всего, с повышением среднесуточной температуры воздуха. Также нужно отметить увеличение амплитуды значений CO_2 к началу февраля — середине летнего сезона. Минимальное значение 6,57 мкмоль было измерено в оз. Моховое (62°10'11,0" ю. ш., 58°51'11,1'' з. д. (озеро № 6, см. рис. 1)) на высоте 23 м над уровнем моря. Водосбор озера полно-

стью зарос мхом, на дне — красные водоросли. Большие значения CO_2, равные 51,13 мкмоль, отмечены в озере Подледное (62°10'58,3" ю. ш., 58°52'19,7'' з. д. (озеро № 27, см. рис. 1)), которое находится в непосредственной близости к леднику. Ранее данный водоем имел уровень воды выше нынешнего (на 05.02.2020) на 3,5 м, склоны ледника содержат большое количество красных водорослей, вода озера мутная (36,8 ЕМФ). Максимальное значение CO_2 86,68 мкмоль измерено в небольшом искусственном водоеме, расположенном возле китайской научной станции (62°12'10,3" ю. ш., 58°58'11,3'' з. д. (озеро № 32, см. рис. 1)), принимающем твердые технические отходы станции, вследствие чего вода имеет характерный запах гниения. Значения для этого водоема не учитывались при расчете статистических параметров, однако упомянуть о возможных больших потоках углекислого газа с подобного рода водоемов необходимо с точки зрения сохранения антарктических уникальных ландшафтов и возможных рекомендаций по их защите.

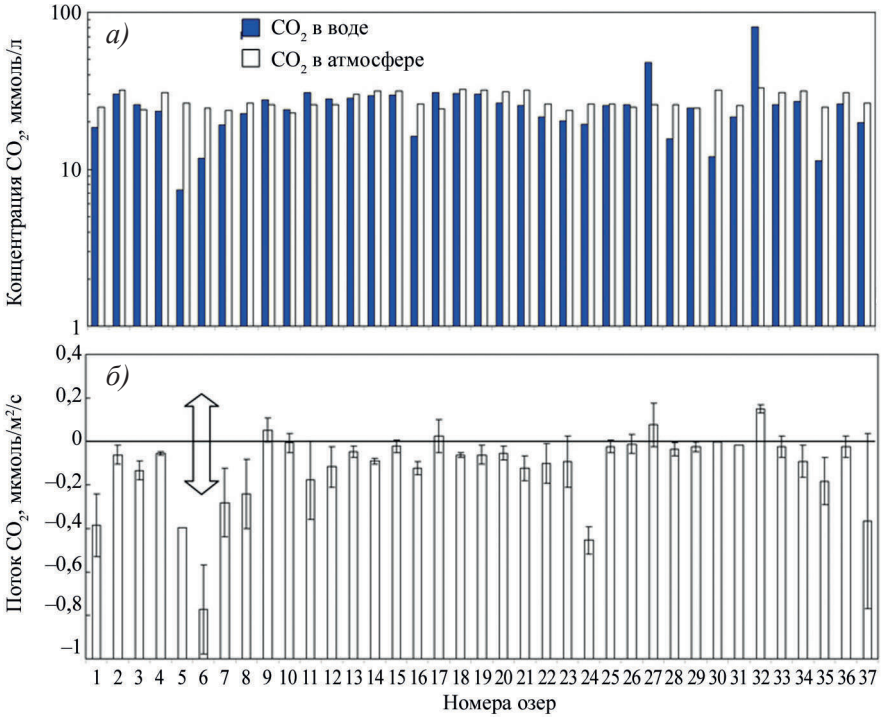

Рис. 5. Концентрация растворенного углекислого газа в воде озер (pCO_2 (вода)) относительно равновесной концентрации в атмосфере (CO_2 (атм)) (*а*) и его потоки с поверхности озер (*б*) в летний период (середина января — конец февраля 2020 г.).

Стрелками указаны эмиссия CO_2 в атмосферу (положительные значения) и поглощение CO_2 водным объектом (отрицательные значения). Места расположения озер см. рис. 1

Fig. 5. The concentration of dissolved carbon dioxide in the water of the lakes (pCO_2 (water)) relative to the equilibrium concentration in the atmosphere (CO_2 (atm)) (*a*) and its flows from the lakes surface (*б*) during the summer period (mid-January — late February 2020).

The arrows indicate CO_2 emission into the atmosphere (positive values) and CO_2 absorption by a lake (negative values). The locations of the lakes are shown in Fig. 1

Пониженное содержание CO_2 в водах озер определяет преимущественно отрицательные величины потоков CO_2 (рис. 5*б*), что отражает поглощение CO_2 из атмосферы. Медианное значение потоков CO_2 для 37 озер составило –0,06 мкмоль/м^2/с (–0,12 ± 0,17 мкмоль/м^2/с, среднее ± SD стандартное отклонение) при вариации от –0,77 до + 0,17 мкмоль/м^2/с. Более значимые потоки поглощения CO_2 из атмосферы характерны ручьям: медианное значение — –0,52 мкмоль/м^2/с при варьировании от –0,14 до –0,95 мкмоль/м^2/с. Общая зависимость потоков диоксида углерода с водных поверхностей п-ова Файлдс от его концентраций в водных объектах приведена на рис. 6.

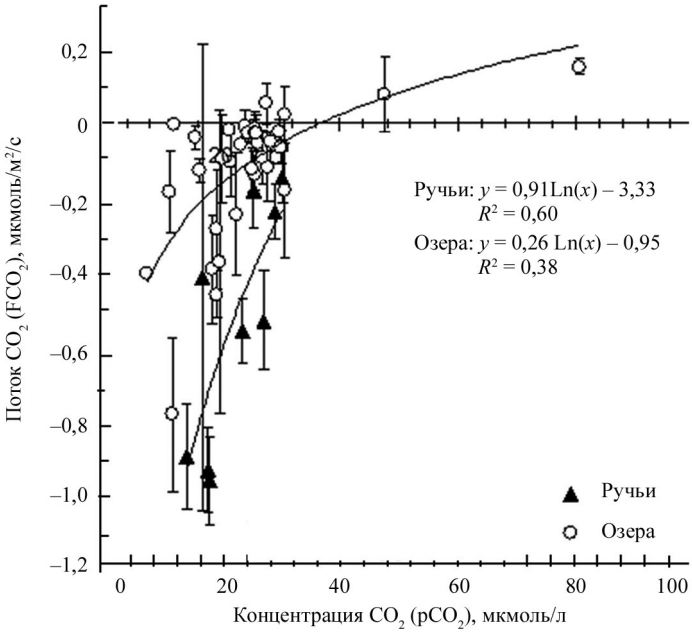

Рис. 6. Зависимость обменных потоков CO_2 с поверхности водного зеркала озер и ручьев от концентрации растворенного в воде CO_2

Fig. 6. The dependence of the CO_2 exchange fluxes from the surface of the lakes and streams on the concentration of dissolved CO_2

Потоки метана. В общей сложности определены потоки метана CH_4 с поверхности 101 водного объекта (рис. 7), включая поверхность водного зеркала и прилегающих территорий. Показано, что средние концентрации метана в воздухе при экспозиции камеры 2 мин над поверхностью озер площадью более 200 м^2 составляли от 7 до 14 ppm, водных объектов площадью от 50 до 200 м^2 — от 15 до 35 ppm, водных объектов площадью менее 50 м^2 — от 3 до 40 ppm. Интенсивнее всего выделение метана (свыше 1000 ppm за минуту) регистрировалось из отверстий в донных отложениях некоторых озер и малых водоемов. Самые низкие значения концентрации метана (0–3 ppm) улавливались с поверхности снежников. С прилегающей к водным объектам территории, которая характеризовалась усиленным водным режимом грунтов и наличием альго-бактериальных матов или мхов, концентрация

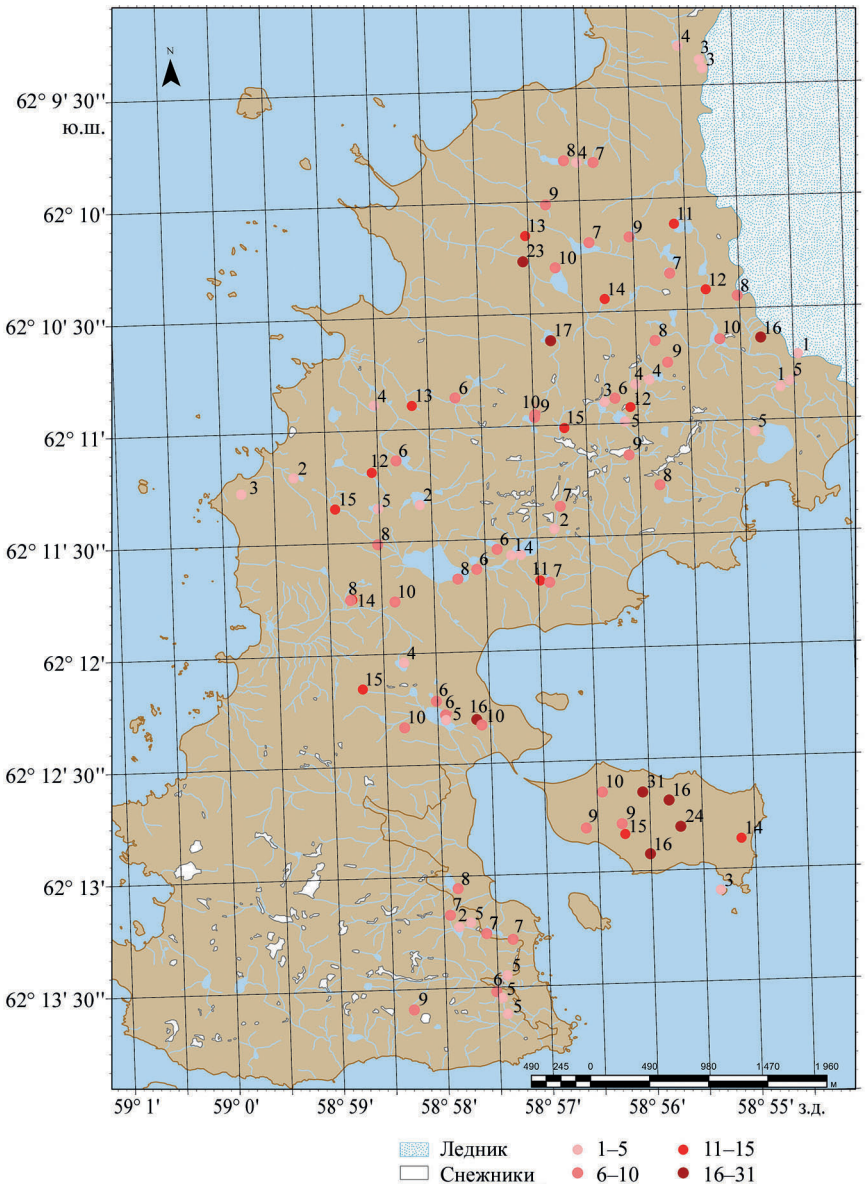

Рис. 7. Пространственное распределение значений эмиссии метана (CH_4) с поверхности озер п-ова Файлдс

Fig. 7. Spatial distribution of methane emissions (CN_4) from the surface of Fildes Peninsula Lakes

метана в камере составляла от 0 до 15 ppm за 2 мин. С поверхности приледниковой морены величина концентраций регистрировалась в пределах 10–15 ppm, с поверхности ручьев в пределах 1–3 ppm. При анализе обобщенных данных выделения метана со всех исследованных водных объектов п-ова Файлдс был сделан вывод о том, что концентрация метана в образцах воздуха с поверхности водных объектов

увеличивалась по мере удаления водного объекта от ледника Коллинз. Исключение составляют водоемы о. Ардли, где высокая концентрация CH_4 в воздухе определялась в основном высоким содержанием органического вещества в орнитопочвах, которое подвергалось микробному разложению. Следует отметить, что концентрации метана, приведенные в данном исследовании, были зафиксированы при помощи течеискателя метана SPD203 и представляют собой не столько количественную, сколько качественную характеристику. Тем не менее массив полученных данных и сравнение значений концентрации метана, улавливаемых течеискателем SPD203 и переносным газоанализатором Picarro, которое было проведено в дальнейшем, позволяют определить диапазоны значений интенсивности выделения метана с поверхности водных объектов, где показания SPD203 в диапазоне 0–4 ppm соответствуют поглощению метана, а показания выше 5 ppm — его выделению.

Дискуссия

Изучением озер п-ова Файлдс (о. Кинг Джордж) занимаются многие ученые на протяжении десятков лет. Однако до сих пор остаются вопросы по специфике функционирования водных экосистем и их особенностям.

Подробные работы на гидрологической системе оз. Китеж п-ова Файлдс ранее проводились в январе–марте 2012 г. [12]. Неоднократно измерены расходы воды в ручьях, даны значения скоростей течения, уровней воды, приведены батиметрические характеристики озер. В январе 2012 г. расход воды в ручье из оз. Китеж изменялся от 0,06 м^3/с (09 января) до 0,135 м^3/с (11 января), после чего происходило его постоянное падение до 0,02 м^3/с (26 марта). Для января 2020 г. характерны большие значения расходов воды и смещение пика на конец января. Максимальный расход 3 м^3/с наблюдался 28 января 2020 г. Измеренные расходы водотока из оз. Китеж и других временных ручьев имели также бóльшие значения, чем в летний сезон 2012 г., что, видимо, связано с метеорологическими характеристиками данного конкретного года, это обусловливает необходимость изучения многолетнего изменения заснеженности полуострова, динамики снежников и скоростей отступания ледникового склона.

Значения электропроводности озер летом 2020 г. соотносятся с ранее полученными в летний период 2013–2014 гг. значениями для озер п-ова Файлдс [2] и оазиса Холмы Ларсеманн [18]. Для водоемов п-ова Файлдс минерализация имела амплитуду 11–151 мг/л. В летние месяцы 2011–2015 гг. минерализация водоемов оазиса Холмы Ларсеманн варьировала от 11 до 970 мг/л, а антарктическим летом 2017–2018 гг. изменялась от 14,9 до 477 мг/л [10]. Отмеченное максимальное значение — 1500 мг/л. Для озер оазиса Ширмахера значения минерализации укладываются в те же пределы, что и для водоемов п-ова Файлдс.

Концентрация растворенного кислорода в воде всех водоемов оазисов в летний период довольно высокая, часто отмечается перенасыщение. Среднее значение летом 2020 г. в озерах п-ова Файлдс было 10,8 мг/л, или 85,63 %, а для тех же водоемов летом 2013–2014 гг. концентрация O_2 изменялась от 63 до 106 % насыщения [2].

В озерах п-ова Файлдс концентрации кремния имели меньшие значения и амплитуду летом 2020 г., чем летом 2013–2014 гг.: они изменялись от 0,01 до 2,80 мг/л при среднем измеренном значении 1,17 мг/л. Для озер других оазисов были зафиксированы другие значения. Так, для озер оазиса Холмы Ларсеманн концентрации кремния составляли от 16,98 мг/л в оз. Степпед до 24,55 мг/л в оз. Прогресс в период 60-й РАЭ. Возможно, разница в значениях на порядок связана

с методами определения кремния, хотя в обоих случаях пробы анализировались после доставки замороженных проб в Санкт-Петербург в ААНИИ на одном и том же приборе.

По данным более ранних исследований [25], водоемы оазиса Ширмахера относятся к хлоридно-натриевым III типа, а для озер п-ова Файлдс определено, что они, по большей части, хлоридно-натриевые II типа. Согласно [9] озера Китеж, Слаломное и Длинное п-ова Файлдс классифицированы как хлоридно-сульфатные и сульфатно-хлоридные, при этом отмечена изменчивость класса озер от года к году. Так, для описанного в работе 2020 г. оз. Длинное нами отмечены сульфатно-кальциевые воды. В [2] отмечается также наличие III типа водоемов, что было выделено и для лета 2020 г. — шесть озер имели III тип вод. В целом нужно отметить морское влияние на формирование гидрохимического состава вод — либо в результате поступления солей из почвы и верхнего слоя грунтов, обогащенных минералами после отступания моря при снижении его уровня, либо в результате аэрозольного привноса солей с морских заливов. Влияние морских аэрозолей на тип вод отмечается и в работе [10], в которой указана последовательность ионов по мере убывания их концентрации в воде $Cl^- > HCO_3^- > SO_4^{2-} > NO_3^-$ и $Na^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+} > K^+$ для водоемов оазиса Холмы Ларсеманн, т. е. превалирующими ионами являются натрий и хлорид. Также факторами, формирующими ионный состав вод, являются тип поверхностного и грунтового притока в озеро, геологическое строение котловины, флора и фауна водосбора.

Анализ содержания биогенных элементов в озерах весьма сложен. Это во многом зависит от времени отбора проб в течение летнего сезона, от метеопараметров определенного года и, соответственно, от динамики численности гидробионтов, от глубины отбора проб и, наконец, от метода хранения, консервации и обработки материала. Достаточно низкое содержание минерального фосфора или азота может указывать на то, что данные элементы являются лимитирующими для роста первичной продукции в экосистеме водоема. Иногда значения нитратов в озерах могут варьировать очень значительно, в том числе в течение летнего периода. Так, в 2012 г. содержание нитратов в оз. Прогресс (оазис Холмы Ларсеманн) не превышало 0,06 мг/л, а в 2015 г. составляло 0,11 мг/л. Для оз. Степпед характерны большие различия: для 2012 г. отмечена концентрация 0,58 мг/л, для 2015 г. это значение было 0,14 мг/л [17]. В водоемах о. Кинг Джордж летом 2020 г. концентрация нитратов имела существенную амплитуду от 0 до 11,5 мг/л. В более ранних исследованиях [6] значения биогенных элементов могли достигать 0,49 мг/л для фосфатов (оз. Вильямс, Холмы Вестфольда), 0,41 мг/л для нитратов и 0,41 мг/л для ионов аммония (оз. Аце, Холмы Вестфольда). Для озер вблизи станции Беллинсгаузена ранее были отмечены максимальные значения фосфатов 0,02 мг/л и 0,1 мг/л нитратов NO_3 в оз. Длинное в летний сезон 2009–2010 гг. [9].

Для п-ова Файлдс в среднем концентрация фосфатов составляет 0,92 мг/л с амплитудой от 0 мг/л до 8,04 мг/л, а летом 2015 г. значения фосфатов в озерах оазиса Холмы Ларсеманн не превышали 0,05 мг/л. В некоторых озерах (Террасовое, Снежное, Радостное) отмечено большое содержание бактериальных матов, рачков, зеленых и красных водорослей, что позволяет сделать вывод о том, что именно разложение отмершего органического вещества приводит к повышению концентрации биогенных элементов в воде.

Данные по измерению растворенного углекислого газа и его потоков с поверхности озер показали, что все типы водных объектов п-ова Файлдс, как правило, характеризуются поглощением углекислоты из атмосферы, независимо от их размера и температурного режима. Полученные нами данные согласуются с ранее опубликованными в работе [22] для оз. Китеж. Поглощающая способность, вероятно, зависит от трофности водоемов или связана с иными природными факторами, которые будут выявлены в результате всестороннего анализа всех полученных материалов. Значительный поток метана в атмосферу с поверхности водоемов отмечается в непосредственной близости от края ледникового щита, с поверхности небольших озер, расположенных на обогащенной органическим веществом морене, а также с поверхности озер на о. Ардли в зоне расположения колоний пингвинов.

Самоочищающая способность водных экосистем ранее определялась для антарктических исследований для других оазисов. Так, согласно работе [17], для оз. Степпед оазиса Холмы Ларсеманн отношение $D/P_{вал}$ равно 4,3, а для оз. Прогресс — 7,1. Для озер Верхнее и Водоросли оазиса Ширмахера $D/P_{вал}$ было 9,3 и 3,3 соответственно, что свидетельствует о высокой самоочищающей способности водоемов. Для озера Метановое на п-ове Файлдс отмечено существенное превышение деструкции органического вещества над валовой первичной продукцией. Однако для озера Красных водорослей п-ова Файлдс получены значения $D/P_{вал}<1$, что говорит о более высоком трофическом статусе некоторых водоемов о. Кинг Джордж. Наличие мезотрофных водоемов подтверждается количественными значениями биогенных элементов, а также большой биомассой фито- и зоопланктона в некоторых водоемах. Происходит заболачивание некоторых долин водотоков оазиса.

Ранее в работе [1] отмечалось, что, невзирая на малое биоразнообразие в антарктических оазисах, именно эти уникальные экосистемы могут служить индикаторами климатических изменений.

Заключение

Проведенные в январе–феврале 2020 г. исследования показали разнообразие параметров озер и небольших, зачастую временных, водных объектов. Водные экосистемы изменяются в течение непродолжительного летнего сезона, но в целом остаются довольно постоянными за многолетний период, что подтверждает выполненное сравнение характеристик за ряд лет [19, 2, 9, 12]. Можно только отметить наличие заболоченных территорий в некоторых долинах ручьев и приморских территориях, хотя это тоже, скорее всего, циклично, т. к. остатки мха были найдены в разрезах приледниковых морен [13]. Гидроэкологические процессы в малых водоемах п-ова Файлдс неоднозначны, полностью зависят от климатических и метеорологических особенностей и требуют дальнейшего изучения. Гидрохимические показатели водоемов свидетельствуют об увеличивающейся антропогенной нагрузке, а в работе [2] говорится еще о превышении содержания тяжелых металлов в воде озер вблизи антарктических научных станций на п-ове Файлдс. В данной работе выявлены высокие концентрации фосфатов в воде озер, отмеченные в районах гнездования птиц, что явно носит природный характер или возникает ввиду разбавления отложенного на дне органического вещества. Дальнейшее потепление на полуострове принесет неизбежное увеличение биоразнообразия и продолжение эвтрофирования озер.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Результаты анализа данных использованы для выполнения гранта Российского научного фонда (РНФ № 23-27-00201 «Создание электронного атласа озер антарктических оазисов»). Анализ потоков метана проведен при поддержке гранта РНФ № 21-17-00163.

Благодарности. Авторы выражают благодарность Российской антарктической экспедиции (РАЭ ААНИИ) за логистику исследований в период летнего сезона 65-й РАЭ, а также лабораториям ОШЛ ААНИИ и Ресурсному центру СПбГУ «Методы анализа состава вещества» за выполненные гидрохимические анализы.

Competing interests. The authors declare no conflict of interest.

Funding. The results of the data analysis were used to the grant report of the Russian Scientific Foundation (RSF No. 23-27-00201 “Creation of an electronic atlas of Antarctic oases lakes”). Methane flux was analyzed within grant RSF No. 21-17-00163.

Acknowledgments. The authors express gratitude to the Russian Antarctic Expedition (RAE AARI) for the logistics of research during the summer season of 65 RAE and to the laboratories of the OSL AARI and the Resource Center of St. Petersburg State University “Methods of substance composition analysis” for the hydrochemical analyses perfomed.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Bargagli R. Atmospheric chemistry of mercury in Antarctica and the role of cryptogams to assess deposition patterns in coastal ice-free areas. *Chemosphere*. 2016;163:202–208. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.08.007
2. Скороспехова Т.В., Федорова И.В., Четверова А.А., Алексеева Н.К., Веркулич С.Р., Ёжиков И.С., Козачек А.В. Особенности гидрохимического режима водных объектов полуострова Файлдс (о. Кинг Джордж, Западная Антарктика). *Проблемы Арктики и Антарктики.* 2016;(2):79–91.

   Skorospekhova T.V., Fedorova I.V., Chetverova A.A., Alekseeva N.K., Verkulich S.R., Yozhikov I.S., Kozachek A.V. Features of the hydrochemical regime of water bodies of the Files Peninsula (King George Island, West Antarctica). *Problemy Arktiki i Antarktiki = Problems of Arctic and Antarctic*. 2016;(2):79–91. (In Russ.).
3. Симонов И.М. *Оазисы восточной Антарктиды*. Л.: Гидрометеоиздат; 1971. 176 с.
4. Convey P., Chown S.L., Clarke A., Barnes D.K.A., Bokhorst S., Cummings V., Ducklow H.W., Frati F., Green T.G., Gordon S., Griffiths H.J., Howard-Williams C., Huiskes A.H.L., Laybourn-Parry J., Lyons W.B., Mcminn A., Morley S.A., Peck L.S., Quesada A., Robinson S.A., Schiaparelli S., Wall D.H. The spatial structure of Antarctic biodiversity. *Ecological Monographs*. 2014;84(2):203–244.
5. Laybourn-Parry J., Pearce D. A. The biodiversity and ecology of Antarctic lakes: models for evolution. *Phil. Trans. R. Soc. B*. 2007;362:2273–2289.
6. Laybourn-Parry J., Wadham J.L. *Antarctic Lakes*. Oxford University Press; 2014. https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199670499.001.0001
7. Kavan J., Nedbalova L., Nyvlt D., Tomas Č.E., Juan M.L. Status and short-term environmental changes of lakes in the area of Devil’s Bay, Vega Island, Antarctic Peninsula. *Antarctic Science*. 2021;33(2):150–164. https://doi.org/10.1017/S0954102020000504
8. Сократова И.Н. *Антарктические оазисы. История и результаты исследований*. СПб.: ААНИИ; 2010. 274 с.
9. Onishchuk N.A., Golobokova L.P., Vershinin K.E., Zhuchenko N.A. Hydrochemical composition of glacial lakes on inshore Russian Antarctic stations. *Geochemistry*. 2020; 80(3):125591. https://doi.org/10.1016/j.chemer.2019.125591

10. Magesh N.S., Botsa S.M., Dessai S., Mestry M., Leitao T.D.L., Tiwari A. Hydrogeochemistry of the deglaciated lacustrine systems in Antarctica: Potential impact of marine aerosols and rock-water interactions. *Science of the Total Environment*. 2020;706:135822. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135822

11. Какарека С.В., Кухарчик Т.И., Кокош Ю.Г., Саливончик С.В., Кудревич М.А., Гигиняк Ю.Г., Мямин В.Е., Лукашанец Д.А. Пространственные особенности химического состава снежного покрова Холмов Тала, Восточная Антарктида. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2021;67(1):28–43. https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-1-28-43

    Kakareka S.V., Kukharchyk T.I., KokoshYu.G., Salivonchyk S.V., Kudrevich M.A., Giginyak Y.G., Myamin V.E., Lukashanets D.A. Spatial features of the chemical composition of Thala Hills surface snow, East Antarctica. *Arctic and Antarctic Research*. 2021;67(1):28–43. (In Russ.). https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-1-28-43

12. Shevnina E., Kourzeneva E. Thermal regime and components of water balance of lakes in Antarctica at the Fildes peninsula and the Larsemann Hills. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. 2017;69(1):1317202. https://doi.org/10.1080/ 16000870.2017.1317202

13. Веркулич С.Р. Изменения климата, уровня моря и оледенения в краевой зоне Антарктиды в течение последних 50 тысяч лет. *Криосфера Земли*. 2022;26(2): 3–24. https://doi.org/10.15372/KZ20220201

    Verkulich S.R. Changes in climate, sea level and glaciation in the regional zone of Antarctica over the past 50 thousand years. *Kriosphera Zemli = Earth's Cryosphere*. 2022;26(2):3–19. https://doi.org/10.15372/KZ20220201

14. Carrizo D., Sánchez-García L., Javier M.R., García-Rodríguez F. Discriminating sources and preservation of organic matter in surface sediments from five Antarctic lakes in the Fildes Peninsula (King George Island) by lipid biomarkers and compound-specific isotopic analysis. *Science of the Total Environment*. 2019;672:657–668. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.459

15. Nabokin M. Faunistic analysis of freshwater zooplankton in small rock pools of Maritime Antarctica. *Ukrainian Antarctic Journal*. 2022;20(1):113–124. https://doi.org/10.33275/1727-7485.1.2022.694

16. Vincent W.F., Laybourn-Parry J. *Polar lakes and rivers — limnology of Arctic and Antarctic aquatic ecosystems*. Oxford University Press; 2008. 346 p.

17. Нигаматзянова Г.Р., Федорова И.В., Духова Л.А. Результаты мониторинга зоопланктонных сообществ пресноводных озер оазиса Холмы Ларсеманн (Восточная Антарктида). *Современные тенденции развития науки и технологий*. 2015;8(1):56–65.

    Nigamatzyanova G.R., Fedorova I.V., Dukhova L.A. Results of Monitoring the Zooplankton Communities of Freshwater Lakes Oasis of Larsemann Hills (East Antarctica). *Sovremennye tendenzii razvitiya nauki i tehnologiy= Current trends in the development of science and technology*. 2015;8(1):56–65. (In Russ.).

18. Burdo A., Nikitina V., Abakumov E. Algae of terrestrial biotopes near the Russian Antarctic scientific station Bellingshausen, King George Island. *Biological Communications*. 2019;64(3):189–200. https://doi.org/10.21638/spbu03.2019.303

19. Поважный В.В. Гидробиологические наблюдения на станции Беллинсгаузен в период работы 52-й РАЭ. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2009;3(83):49–63.

    Povazhny V.V. Hydrobiological observations at the Bellingshausen station during the operation of the 52nd RAE. *Problemy Arktiki I Antarktiki = Problems of Arctic and Antarctic*. 2009;3(83):49–63. (In Russ.).

20. Gregorich E.G., Hopkins D.W., Elberling B., Sparrow A.D., Novis P., Greenfield L.G., Rochette P. Emission of CO, CH_4 and N_2O from lakeshore soils in an Antarctic dry valley. *Soil Biology & Biochemistry*. 2006; 38:3120–3129. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.01.015

21. Roldán D.M., Carrizo D., Sánchez-García L., Menes R.J. Diversity and effect of increasing temperature on the activity of methanotrophs in sediments of Fildes Peninsula Freshwater Lakes, King George Island, Antarctica. *Front. Microbiol*. 2022;13:822552. https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.822552
22. Thalasso F., Sepulveda-Jauregui A., Cabrol L., Lavergne C., Olgun N., Martinez-Cruz K., Aguilar-Muñoz P., Calle N., Mansilla A., Astorga-España M.S. Methane and carbon dioxide cycles in lakes of the King George Island, maritime Antarctica. *Science of the Total Environment.* 2022;848:157485. http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157485
23. Короткевич Е.С. *Полярные пустыни.* Л.: Гидрометеоиздат; 1972. 420 с.
24. SCAR Composite Gazetteer of Antarctica. Available at: https://data.aad.gov.au/aadc/gaz/scar/ (accessed: 12.03.2024).
25. Bidigare R.R., Ondrusek M.E., Kennicutt M.C. II, Iturriaga R., Harvey H.R., Hoham R.W., Macko S.A. Evidence for a photoprotective function for secondary carotenoids of snow algae. *J. Phycol*. 1993;29(4):427–434. https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.1993.tb00143.x
26. Дмитриев В.В., Боброва О.Н., Грачева И.В., Колодкин П.А., Примак Е.А., Седова С.А., Четверова А.А. Мониторинг и моделирование продукционно-деструкционных отношений в водных экосистемах. *Успехи современного естествознания*. 2019;(1): 82–87.

    Dmitriev V.V., Bobrova O.N., Gracheva I.V., Kolodkin P.A., Primak E.A., Sedova S.A., Chetverova A.A. Monitoring and modeling of production and destruction relations in aquatic ecosystems. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya = Successes in modern natural science*. 2019;(1):82–87. (In Russ.)
27. Алекин О.А. *Основы гидрохимии*. Л.: Гидрометеорологическое издательство; 1970. 444 с.

ГЛЯЦИОЛОГИЯ И КРИОЛОГИЯ
GLACIOLOGY AND CRYOLOGY OF THE EARTH

Оригинальная статья / Original paper
https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-1-71-86
УДК 551.467

Айсберговая опасность в морях Арктической зоны Российской Федерации в условиях современных климатических изменений

И.А. Бычкова✉, В.Г. Смирнов, С.В. Михальцева, Е.В. Платонова

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

✉*bychkova@aari.ru*

ИАБ, 0009-0005-9736-1930; СВМ, 0009-0004-0732-3467; ЕВП, 0009-0000-2628-6543

Аннотация. Исследованы особенности айсбергообразования у основных архипелагов Российской Арктики — Земли Франца-Иосифа, Северной Земли и Новой Земли — за последнее десятилетие, отличавшееся высокой климатической изменчивостью. Для мониторинга айсбергов использованы некоммерческие спутниковые изображения видимого спектрального диапазона спутников Landsat-7, 8 и Sentinel-2, а также радиолокационные снимки Sentinel-1. Показана связь интенсивности айсбергообразования, включая количество айсбергов, ежегодно откалывающихся от выводных ледников, с аномалиями температуры приповерхностного воздуха в Арктике. Максимальная айсберговая активность ледников наблюдалась в рекордно теплом для Арктики 2020 г., размер наибольшего образовавшегося айсберга в этом году составил 5 км.

Ключевые слова: айсберги, Арктика, видимый диапазон, изменения климата, ледники, спутниковый мониторинг, спутниковый радиолокатор

Для цитирования: Бычкова И.А., Смирнов В.Г., Михальцева С.В., Платонова Е.В. Айсберговая опасность в морях Арктической зоны Российской Федерации в условиях современных климатических изменений. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2024; 70(1): 71–86. https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-1-71-86

Поступила 06.11.2023 **После переработки 11.12.2023** **Принята 28.12.2023**

Iceberg danger in the seas of the Russian Federation Arctic Zone under modern climate change conditions

Irina A. Bychkova✉, Vladimir G. Smirnov, Svetlana V. Mikhaltseva, Eugenia V. Platonova

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

✉*bychkova@aari.ru*

IAB, 0009-0005-9736-1930; SVM, 0009-0004-0732-3467; EVP, 0009-0000-2628-6543

Abstract. The aim of the research was to study the relationship between the intensity of iceberg formation in the Russian Arctic including the number of icebergs calving annually from outlet glaciers and surface air temperature anomalies. The research was carried out on the basis of satellite monitoring using non-commercial, freely distributed satellite information from optical-electronic satellites Landsat-8 (spatial resolution 15 m) and Sentinel-2 (spatial resolution 10 m) and the radar satellite Sentinel-1 (pixel size 20×40 m). To achieve the aim, an iceberg detection technique was used based on statistical criteria for searching for gradient zones in the analysis of two-dimensional fields of satellite images. Based on the analysis of satellite data of the visible spectral range of the Landsat-8 and Sentinel-2 satellites and Sentinel-1 radar data the maximum spatial dimensions of icebergs formed by the outlet glaciers of Severnaya Zemlya, Franz Josef Land (ZFI) and Novaya Zemlya in 2012–2022 were estimated. Satellite monitoring of the Severnaya Zemlya region was carried out using visible range images in the spring season (March–May), characterized by the best observation conditions in terms of cloudiness, natural light, and monitoring of icebergs most of which are located in fast ice at this time. Monitoring of the ZFI area was carried out using radar data in the period August-September, corresponding to the minimal ice cover conditions. Satellite monitoring of the Novaya Zemlya region was carried out using visible images in the summer season. In total, about 500 satellite images were analyzed. The discusses the dependence of the intensity of the iceberg formation process on the ice shelf and outlet glaciers with a floating edge on the surface air temperature and the maximum thickness of fast ice. It is shown that the abnormally warm weather that set in 2020 during the period of ice melting led to a sharp intensification of the process of glacier melting in the Russian Arctic and the formation of almost 8,000 icebergs near Severnaya Zemlya, more than 6,600 icebergs near ZFI and over 1,000 icebergs near the western coast of Novaya Zemlya. For all the areas of the Russian Arctic studied in the period 2012–2022 an increase was noted in the maximum observed sizes of icebergs calving from glaciers. The largest iceberg, whose length was 5 km, broke off in 2020 from the Matusevich ice shelf.

Keywords: Arctic, glaciers, icebergs, satellite monitoring, visible spectral range, satellite radar, climate change

For citation: Bychkova I.A., Smirnov V.G., Mikhaltseva S.V., Platonova Eu.V. Iceberg danger in the seas of the Russian Federation Arctic Zone under modern climate change conditions. *Arctic and Antarctic Research*. 2024; 70 (1): 71–86. (In Russ.). https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-1-71-86

Received 06.11.2023 **Revised 11.12.2023** **Accepted 28.12.2023**

Введение

Наблюдающийся в настоящее время рост грузопотока в Арктике, обусловленный необходимостью использования альтернативных маршрутов доставки грузов из-за введенных против РФ экономических санкций, повышает риск воздействия на безопасность судоходства опасных ледяных образований, прежде всего айсбергов. Средняя вероятность столкновения с айсбергом на трассах Северного морского пути (СМП) составляет сейчас, по оценке специалистов Крыловского государственного

научного центра, 1,4 % [1]. Однако эта оценка не учитывает изменчивость плотности распределения айсбергов в разные годы, отличающиеся по климатическим условиям. Наблюдается ускорение процесса отступания ледников с разрушением их фронтальных частей и образованием большого количества айсбергов. В последнее десятилетие в Арктике произошли заметные климатические изменения, сопровождавшиеся сокращением ледяного покрова на арктических архипелагах и увеличением безледного периода на акваториях морей. В результате активизировались процессы таяния ледников. Одновременно наблюдается усиление волнения, возрастает повторяемость осенних штормов [2], что приводит к усилению ветро-волновой нагрузки на выводные ледники и, соответственно, ускорению процесса откола айсбергов. Также увеличилась повторяемость туманов, ограничивающих видимость на судоходных трассах. Все эти факторы привели к возрастанию айсберговой угрозы на Северном морском пути (СМП) и в районах добычи углеводородов на прибрежном шельфе. В работе [2] отмечен рост за последнее десятилетие количества айсбергов, их кусков и обломков, наблюдающихся по трассе СМП, причем айсберги фиксируются как по спутниковым данным, так и по данным визуальных наблюдений с судов. Кроме этого, авторами [3] отмечено смещение южной границы распространения айсбергов и их обломков к югу, вплоть до береговой черты.

Основными источниками айсбергов в морях Российской Арктики являются архипелаги Земля Франца-Иосифа (ЗФИ), Новая Земля и Северная Земля. Начиная с 2010 г. общей тенденцией в динамике ледников основных архипелагов Арктической зоны РФ, связанной с климатическими изменениями, стало постепенное сокращение их покровного оледенения, одновременно возрос объем айсбергового стока. Изменилась интенсивность айсбергообразования в зависимости от сокращения или увеличения площади подвижного фронта выводных ледников.

Первую попытку описать плотность распределения айсбергов в морях Российской Арктики предпринял В. Абрамов, обобщивший данные наблюдений ледовой авиаразведки 2-й половины XX в. [4]. С тех пор в связи с климатическими изменениями в Арктике данные Атласа Абрамова перестали быть актуальными, появилась необходимость в новых исследованиях айсбергообразования и распространения айсбергов в Арктической зоне РФ. В 2011–2014 гг. в рамках 7-й научной программы Евросоюза и Российской Федерации по проекту MAIRES («Мониторинг ледников и морских льдов Арктики с использованием российских и европейских спутников») разрабатывались методы мониторинга арктических айсбергов [5]. В проекте MAIRES участвовали: Центр по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена (NERSC, Норвегия), Фонд «Нансен-центр» (Россия); университет прикладных наук Joanneum Research (Австрия); Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК).

Работы по проекту MAIRES позволили получить по снимкам оптического радиометра ASTER ИСЗ Terra плотность распределения айсбергов, наблюдавшихся в марте–апреле 2012 г. в Баренцевом и Карском морях вблизи выводных ледников архипелагов Земля Франца-Иосифа и Северная Земля. При оценках использовалось 3 видимых канала (разрешение 15 м) и 1 ближний ИК (разрешение 30 м). Идентификация айсбергов проводилась экспертами вручную на основе использования следующих дешифровочных признаков: наличие тени; наличие яркой полосы на солнечной стороне айсберга; характерная текстура крупных столообразных айсбергов; наличие трещин во льдах вблизи айсберга, вызванных движением относительно льда.

Полученные по спутниковым данным результаты сравнивались с данными ледовой авиаразведки по этим районам, приведенными в Атласе арктических айсбергов В. Абрамова [4]. Как оказалось, локализация максимальной плотности распределения айсбергов в районах исследования, полученная исполнителями проекта MAIRES, аналогична локализации, указанной в работе [4]. Однако в численном выражении айсбергов в 2012 г. стало намного больше, чем в конце XX в. В марте 2012 г. по району прибрежной зоны Земли Франца-Иосифа было проанализировано 34 снимка ASTER, обнаружено 2600 айсбергов, размерами 15 м и выше. Наибольшая плотность айсбергов была отмечена у острова Хоффмана из архипелага Земля Франца-Иосифа. Здесь она превысила 1000 объектов для квадрата 100×100 км. По данным [4] в марте в области максимальной концентрации айсбергов отмечалось в среднем 500 айсбергов, по данным проекта MAIRES — 1200. Различие в количестве обнаруженных айсбергов авторы [5] связали с тем, что в Атласе айсбергов приведены данные, осредненные за несколько лет наблюдений, а в их исследовании — данные лишь за один год.

Анализируя данные видимого диапазона, полученные с ИСЗ Landsat, Aster, «Монитор-Э», авторы [5] пришли к выводу о возможности обнаружения, при благоприятных метеоусловиях (безоблачная погода, светлое время суток), айсбергов, имеющих размеры 2–3 пикселя (60–90 м — для перечисленных выше спутников) и более.

Данные проекта MAIRES характеризуют условия айсбергообразования лишь за один год.

В российской компании СКАНЭКС по спутниковым данным среднего и высокого пространственного разрешения оптических спутников EROS-B, SPOT-4,5 и радиолокационных Radarsat-1,2 за июль–сентябрь 2011–2013 гг. получена оценка распределения айсбергов и определены размеры айсбергов в одном локальном районе — проливе Вилькицкого у Северной Земли. Всего проанализировано 130 спутниковых изображений [6]. Айсберги, обнаруженные авторами работы [6], дрейфовали на открытой воде.

В настоящей работе предпринята попытка исследовать особенности айсбергообразования в районах основных архипелагов Российской Арктики за последнее десятилетие, отличавшееся высокой климатической изменчивостью. Целью работы является получение оценки влияния климатических факторов на интенсивность айсбергообразования в морях Российской Арктики на основании использования некоммерческой спутниковой информации, как радиолокационной, так и с аппаратуры видимого диапазона.

Методика исследований и материалы наблюдений

При спутниковом мониторинге айсбергов выделяют три основные ситуации их нахождения: айсберги в припае, айсберги в дрейфующем льду и айсберги на открытой воде. Наиболее сложный для мониторинга вариант — айсберги в дрейфующих льдах, особенно если айсберги имеют малые размеры. В этой ситуации за айсберги могут быть ошибочно приняты отдельные льдины. Айсберги на открытой воде обнаруживаются легко, благодаря их более высокой яркости и иной текстуре по сравнению с окружающей водой и ледяными полями. Однако при малых размерах айсбергов, сопоставимых с пространственным разрешением используемой для наблюдения спутниковой аппаратуры, один и тот же айсберг сложно идентифицировать на последовательных снимках. Это обстоятельство приводит при подсчете общего количества айсбергов

в регионе к массовым случаям двойного (и тройного…) учета одного и того же айсберга. Айсберги в припае — самый легкий для обнаружения случай, так как айсберги в течение сезона неподвижны, находятся в одной точке и отбрасывают длинные тени, а также образуют линейные подветренные следы после метелей, хорошо различимые на снимках видимого диапазона на фоне ледяного покрова.

В работе для обнаружения айсбергов использована методика анализа двумерных полей яркости спутниковых изображений, основанная на статистических критериях поиска градиентных зон, реализованная в виде авторской программы Iceberg2 [7]. При анализе распределения айсбергов по пространственным размерам использовалась номенклатура WMO, согласно которой айсберги подразделяют на обширные (длиной более 200 м), крупные (длиной 121–200 м), средние (61–120 м), мелкие (15–60 м) [8].

Исследование современных изменений процессов айсбергообразования в Арктике в настоящей работе проводилось по некоммерческой спутниковой информации, доступной в сети интернет. Применялись снимки оптико-электронной аппаратуры OLI ИСЗ Landsat-7,8 (канал 0,5–0,68 мкм, пространственное разрешение 15 м), снимки 8-го канала MSI ИСЗ Sentinel-2 (канал 0,785–0,900 мкм, разрешение 10 м) за 2011–2023 гг., а также радиолокационные изображения Sentinel-1 (режим сверхширокой полосы обзора EW, размер пикселя 20×40 м) за 2015–2021 гг. Всего было проанализировано более пятисот снимков с сайта USGS Global Visualization Viewer (GloVis) и с сайта программы Copernicus Европейского космического агентства.

При анализе снимков учитывались объекты, образующиеся при отколе от выводных ледников, с размерами более 30 м — для снимков видимого диапазона и более 50 м — для радиолокационных изображений. Куски и обломки айсбергов, меньшие по величине, не принимались во внимание.

Для спутникового мониторинга айсбергов в районе Северной Земли был выбран весенний период (март–май). Этот сезон характеризуется лучшими условиями наблюдения как по облачной ситуации (наибольшее количество ясных дней за год), так и по мониторингу айсбергов, большинство из которых находятся в это время в припае и имеют при низких углах Солнца длинные, демаскирующие их тени. В то же время подсчет обнаруженных в припае айсбергов характеризует, по сути, айсберговую активность предыдущего года. Для исключения из анализа айсбергов, образовавшихся в районе мониторинга в предшествующие годы (это айсберги, годами циркулирующие в полузамкнутой акватории или сидящие на мели, во фьорде Матусевича, пр. Красной Армии, бухте Ковалевской и пр.), привлекались данные мониторинга айсбергов за конец предыдущего года. Всего за 2011–2023 гг. по району Северной Земли было проанализировано около 300 снимков Landsat-7,8 и Sentinel-2.

Для мониторинга айсбергов в районе архипелага Земля Франца-Иосифа применить методику обнаружения айсбергов в припае по весенним снимкам видимого диапазона сложно, так как в данное время в районе этого высокоширотного архипелага низкий уровень естественной освещенности, что не позволяет получить достаточное количество снимков для анализа. Поэтому при анализе для мониторинга был выбран летний период, август–сентябрь, когда море освобождается ото льда, количество дрейфующих льдов минимально и фиксируется максимальный айсберговый сток [9, 10]. Так как летом для района ЗФИ характерен высокий процент облачности, в работе основным источником информации для этого архипелага стали всепогодные радиолокационные снимки. Были использованы радиолокационные

данные ИСЗ Sentinel-1 (A,B), режим Extra-Wide Swath Mode (пиксель 40×20 м, полоса обзора 400 км) за 2015–2022 гг. и, в качестве вспомогательной информации, снимки видимого диапазона аппаратуры OLI (панхроматическая съемка, разрешение 15 м, кадр 185×185 км), полученные со спутника Landsat-8 в дни с благоприятной по облачности ситуацией. Всего по району ЗФИ было проанализировано 85 радиолокационных снимков и более 60 снимков Landsat-8.

Спутниковый мониторинг айсбергов в районе баренцевоморского побережья Новой Земли осуществлялся по материалам снимков Landsat-8 за летний период (июль–сентябрь) 2014–2021 гг. Доступные радиолокационные снимки Sentinel-1 (с разрешением 40 м) для анализа не привлекались из-за преобладания в этом районе айсбергов с размерами ниже элемента спутникового пространственного разрешения. Всего использовано 89 снимков видимого диапазона, полученных со спутников Landsat-8 и Sentinel-2. Для обеспечения меньшей вероятности возможного двойного учета одного и того же айсберга на разных снимках использовалась специальная стратегия подбора снимков. Близкие по датам оптические снимки (с разницей в несколько дней) относились, как правило, либо к разным районам архипелага, либо соответствовали району, закрытому облачностью на предыдущем снимке и открывшемуся на новом. Если на двух близких снимках были перекрывающиеся области, причем свободные от облачности, то обнаружение айсбергов проводилось по более контрастному снимку. Также были случаи, когда за 2 дня (например, 7–9 июля 2018 г.) произошел сброс айсбергов с ледника. То есть эти айсберги 7 июля еще не могли быть обнаружены, а 9 июля откол айсбергов произошел, и потребовалось дополнительно проанализировать снимок и за эту дату.

Результаты и обсуждение

Для оценки айсберговой опасности в морях Российской Арктики в условиях происходящих климатических изменений была исследована связь летней температуры приповерхностного воздуха на станциях в районе СМП с интенсивностью разрушения ледников, с количеством ежегодно образующихся у ледников арктических архипелагов айсбергов и с длиной наибольшего айсберга, отколовшегося в год наблюдения. Анализ проводился по данным измерений последнего десятилетия.

Разрушение ледников

Повышение летних температур воздуха, отмечающееся в Арктике в последнее десятилетие, вызывает ускоренное таяние ледников и их деградацию. Особенно этот процесс характерен для шельфовых ледников, находящихся на плаву, и выводных ледников с плавучим фронтальным языком. Под влиянием более теплого воздуха и более теплой морской воды происходит сравнительно быстрое таяние ледника на его верхней и нижней поверхностях. В результате ледник теряет устойчивость и прочность, в нем возникают трещины, а в дальнейшем по этим трещинам происходит откол айсбергов. Разрушение наблюдается у многих шельфовых ледников Арктики в данный климатический период. Например, крупнейший шельфовый ледник Арктики, ледник № 79 в Гренландии, в июле аномально теплого 2020 г. потерял при разрушении площадь в 125 км^2. Разрушение ледника привело к массовому образованию мелких айсбергов[1]. Аналогичная ситуация наблюдается и в Российской

[1] Spalte breaks up. 15.09.2020. URL: https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2020/09/Spalte_breaks_up (дата обращения: 01.10.2023).

Арктике, где в последние годы отмечается ускоренное разрушение крупнейшего шельфового ледника, расположенного во фьорде Матусевича на Северной Земле. Шельфовый ледник Матусевича — это плавучий ледник, образованный выводными ледниками, стекающими с ледниковых куполов Русанова и Карпинского во фьорд Матусевича (рис. 1).

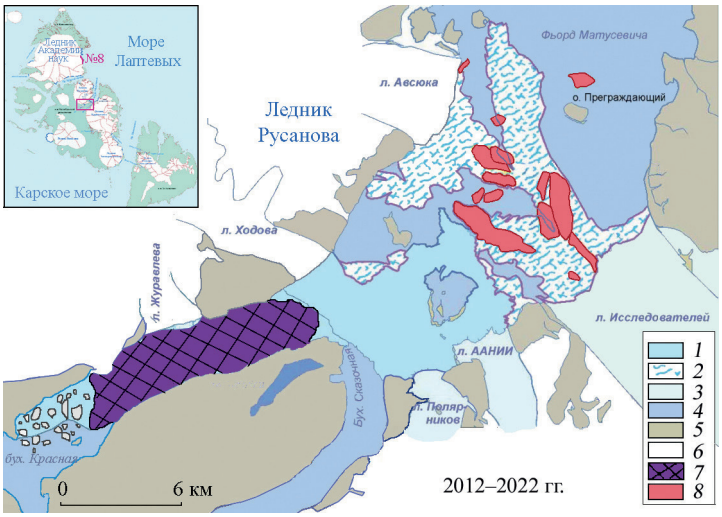

Рис. 1. Разрушение шельфового ледника фьорда Матусевича в 2012–2022 гг. с образованием крупных айсбергов. По данным спутниковых снимков Landsat-7, 8.

1 — шельфовый ледник по состоянию на конец 2012 г.; *2* — утраченная за 2012 г. часть шельфового ледника; *3* — выводной ледник; *4* — открытая морская поверхность; *5* — суша; *6* — ледниковый купол; *7* — шельфовый ледник в границах 2020–2022 гг.; *8* — крупные айсберги, образовавшиеся в результате откола от шельфового ледника в 2012 г. Местоположение ледника показано прямоугольником на карте архипелага (врезка слева)

Fig. 1. Decay of the Matusevich fjord ice shelf in 2012–2022 with the formation of large icebergs. According to satellite images Landsat-7, 8.

1 — ice shelf as of the end of 2012; *2* — part of the ice shelf lost in 2012; *3* — outlet glacier; *4* — open sea surface; *5* — land; *6* — ice dome; *7* — ice shelf within the boundaries of 2020–2022; *8* — large icebergs that formed as a result of breaking off from the ice shelf in 2012. The location of the glacier is shown as a rectangle on the map of the archipelago (inset on the left)

На начало 2011 г. площадь шельфового ледника Матусевича, измеренная по снимку Landsat-7, составляла около 160 км^2. 2011 год был с теплым, дождливым и ветреным летом; в итоге ледник начал ускоренно разрушаться. За год ледник потерял в результате откола айсбергов, их кусков и осколков, а также вследствие таяния часть своей поверхности площадью 17,4 км^2 [7]. Теплее нормы был и 2012 г., когда потери ледника при разрушении составили уже 60 км^2 (рис. 2, 3*а*).

В последующие пять лет процесс распада ледника продолжался, но темпы разрушения замедлились [7]. Лето 2014 г. оказалось аномально холодным, средняя летняя температура воздуха, по данным полярной станции «Остров Голомянный», была отрицательной [11]. В результате ледяной покров во фьорде Матусевича в этот год разрушен не был, не претерпел разрушений и шельфовый ледник. В 2013–2015 гг. в Арктике зимние температуры воздуха были достаточно низкие, благодаря чему

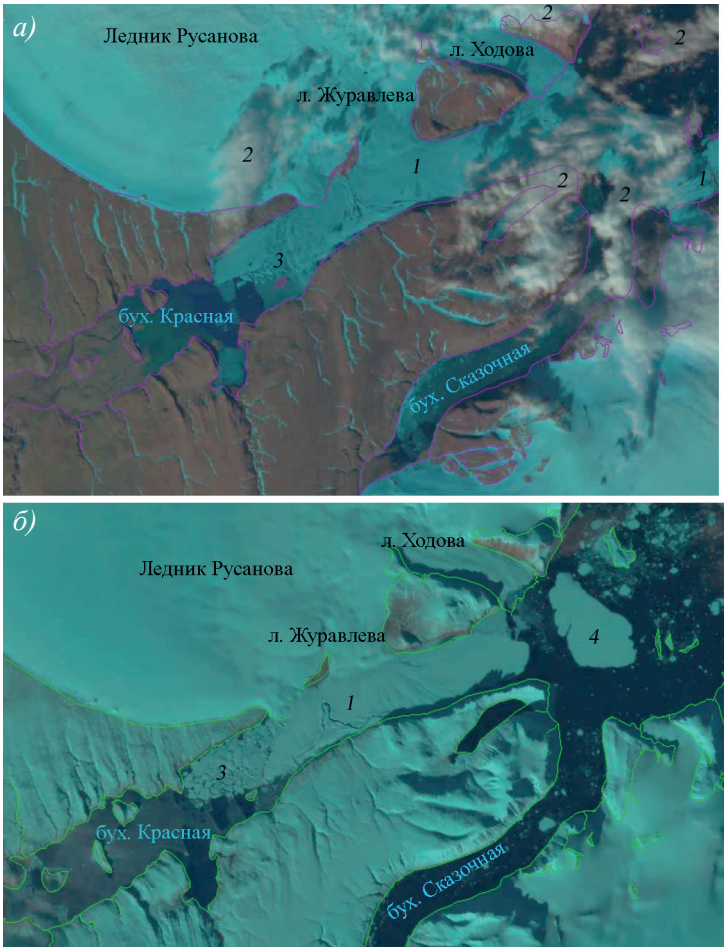

Рис. 2. Шельфовый ледник во фьорде Матусевича на композитных снимках в естественных цветах (2-й, 3-й, 4-й каналы аппаратуры OLE) Landsat-8 за 27 августа 2013 г. (*а*) и за 11 сентября 2022 г. (*б*).

1 — шельфовый ледник; *2* — облака; *3* — айсберги, заблокированные ледником в бухте Красная; *4* — айсберг длиной 5 км. Положение фрагментов снимков обозначено прямоугольником на врезке к рис. 1

Fig. 2. Shelf glacier in Matusevich fjord on composite images in natural colors (2nd, 3rd, 4th channels of OLE equipment) Landsat-8 for August 27, 2013 (*a*) and September 11, 2022 (*б*).

1 — shelf glacier; *2* — clouds; *3* — icebergs blocked by glacier in Krasnaya Bay; *4* — iceberg *5* km long. The position of the fragments of the images is indicated by a rectangle in the inset to Fig. 1

максимальная толщина припая у побережья сибирских морей достигала 180 см [12], превышая уровень 2012 г. на 20 см (рис. 3*б*). В итоге, хотя в 2016 г. летняя температура воздуха на станциях в районе СМП повысилась (рис. 3*а*), существенного разрушения шельфового ледника не произошло, что, по-видимому, связано с предшествующим холодным трехлетием.

2020 г. стал рекордно теплым по температуре приземного воздуха во всем Северном полушарии. В апреле 2020 г. средняя температура воздуха в морской Ар-

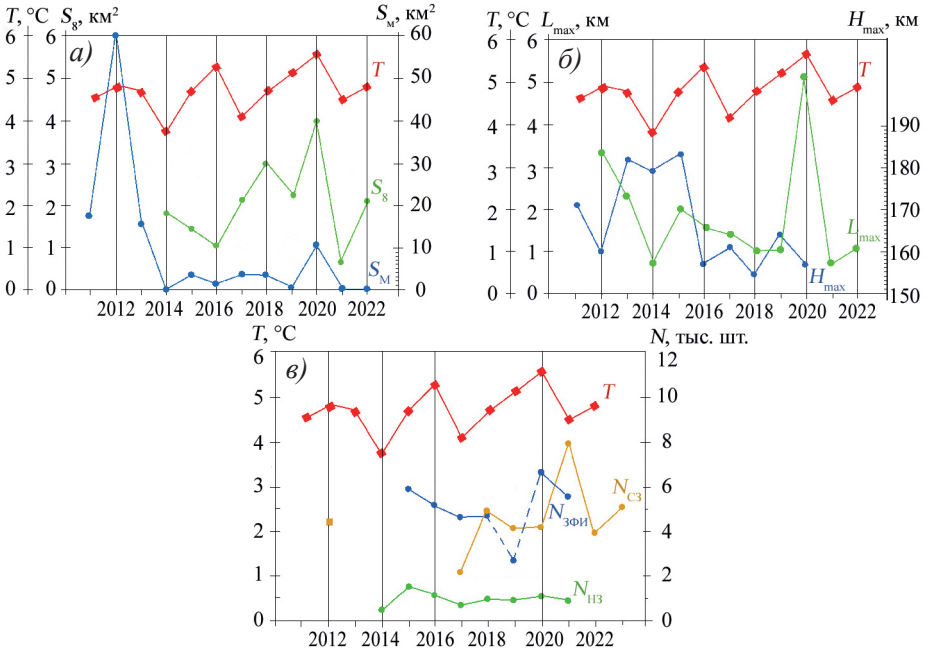

Рис. 3. Влияние климатических факторов на процессы айсбергообразования в Российской Арктике.

а) Сравнение изменчивости приповерхностной температуры воздуха (ПТВ) на станциях в районе СМП (*T*, по данным [13]) с процессом разрушения шельфового ледника Матусевича и выводного ледника № 8 ледникового купола Академии наук.

$S_М$ и S_8 — площадь, потерянная за год ледником Матусевича и ледником № 8 соответственно.

б) Сравнение изменчивости летней ПТВ на станциях в районе СМП и максимальной толщины припая в сибирских морях (H_{max}, по данным [12]) с максимальной длиной айсбергов, откалывающихся ежегодно от ледников Северной Земли (L_{max}).

в) Сравнение изменчивости летней ПТВ на станциях в районе СМП с количеством айсбергов, ежегодно образующихся у архипелагов Российской Арктики.

$N_{ЗФИ}$ — количество айсбергов у Земли Франца-Иосифа, зарегистрированных в летний период; $N_{СЗ}$ — количество айсбергов у Северной Земли, зарегистрированных в весенний период; $N_{НЗ}$ — количество айсбергов у баренцевоморского побережья Новой Земли, зарегистрированных в летний период

Fig. 3. Impact of climatic factors on iceberg formation processes in the Russian Arctic.

a) Comparison of the variability of near-surface air temperature (NSAT, [13]) at stations in the area of the NSR with the process of the Matusevich ice shelf (S_M) and outlet glacier No. 8 of the glacial dome of the Academy of Sciences decay (S_8).

S_M and S_8 — the area lost during the year Matusevich ice shelf and glacier No. 8 and decay respectively.

б) Comparison of the variability of the summer NSAT at stations in the area of the NSR and the maximum fast ice thickness in the Siberian seas ([H_{max},12]) with the maximum length of icebergs breaking off annually from the glaciers of the Severnaya Zemlya (L_{max}).

H_{max} — is the maximum fast ice thickness; L_{max} — the length of the largest iceberg detected by satellite, formed in the area of the Severnaya Zemlya in the year of observation.

в) Comparison of the summer NSAT variability at stations in the area of the NSR and the number of icebergs formed annually near the archipelagos of the Russian Arctic.

$N_{ЗФИ}$ — the number of icebergs at the ZFI registered in the summer; $N_{СЗ}$ — the number of icebergs near Severnaya Zemlya registered in the spring; $N_{НЗ}$ — the number of icebergs off the Barents Sea coast of Novaya Zemlya registered in the summer

ктике, рассчитываемая по данным наблюдений на 41 гидрометеостанции, превысила климатическую норму на 6 градусов [12]. Летом 2020 г., по данным 24 гидрометеостанций, расположенных в районе СМП, был зафиксирован абсолютный максимум приповерхностных температур воздуха в морской Арктике [13]. Эта аномалия была обусловлена выносом теплых воздушных масс из Сибири, где отмечалась необычная жара — на «полюсе холода» в Верхоянске 20 июня зарегистрировали температуру 38 °С. Такая теплая погода, установившаяся в период таяния льдов, привела к резкому сокращению площади ледяного покрова и активизации процесса таяния ледников. В сентябре 2020 г. площадь льда в сибирских арктических морях достигла исторического минимума в 26 000 км^2 [13]. В августе 2020 г. от шельфового ледника Матусевича откололся айсберг площадью более 10 км^2 при длине 5 км (рис. 2*б*). Осенью 2020 г. площадь шельфового ледника, оцененная по снимку Landsat-8, составляла уже лишь 27 км^2.

В 2021–2022 гг. положение ледника Матусевича стабилизировалось. В ближайшие годы, видимо, произойдет его дальнейшее разрушение, при этом окажутся деблокированными айсберги в бухте Красная, образовавшиеся от этого ледника. Ранее такой процесс уже произошел с айсбергами, отколовшимися от выводных ледников в бухте Сказочная, — теперь айсберги, попадающие в эту бухту с выводного ледника, проходят далее во фьорд Матусевича. На 2022 г. в бухте Красная было около 100 айсбергов, длина наибольшего составлял 1 км (рис. 2*б*). После выброса этих айсбергов во фьорд численность ежегодно откалывающихся во фьорд айсбергов естественным образом снизится, так как их источником останутся лишь выводные ледники.

Наблюдавшиеся в последнее десятилетие процессы разрушения краевой части выводных ледников, находящейся на плаву, были отчасти подобны процессам, наблюдаемым при разрушении шельфового ледника. Самым крупным из таких выводных ледников на Северной Земле является ледник № 8 (номер ледника дан по Всемирному каталогу ледников, World Glacier Inventory, из базы данных ледников GLIMS (Global Land Ice Measurements from Space)[2]. Наибольшее разрушение ледника № 8 было отмечено также в аномально теплом 2020 г., в этот год ледник потерял по спутниковым данным 4 км^2 площади краевой части (рис. 3*а*). Второй по значению локальный максимум потерь льда при разрушении ледника № 8 (3 км^2) отмечен в 2018 г., когда, при том что летняя температура воздуха не была в числе самых высоких за 2011–2022 гг., был зарегистрирован минимум максимальной толщины припая (рис. 3*б*).

Изменение максимальной длины айсбергов, образующихся у арктических архипелагов

Деградация материковых льдов отражается на параметрах образующихся айсбергов. Процессы таяния вызывают повышение скорости течения ледников, большее выдвижение краевой части выводных ледников в море. В итоге на плаву оказывается более длинный кусок ледяного языка, который разламывается далее в результате ветро-волнового воздействия и приливных колебаний. При этом на приглубых участках моря образуются айсберги большей длины. В случае выхода выводного ледника на мелководье увеличения длины образующихся айсбергов не происходит.

[2] World Glacier Inventory. URL: https://www.glims.org/RGI/rgi60_dl.html (дата обращения: 01.10.2023).

Выходя в море, ледник соприкасается с морским дном, в итоге образуется много мелких айсбергов — как это наблюдается у ледника Вавилова на Северной Земле.

При разрушении шельфового ледника Матусевича изначально образуются крупные айсберги, длина некоторых из них превышает 1–2 км. В теплые 2012 и 2020 гг. зарегистрированы наиболее крупные айсберги — 3,25 и 5 км соответственно. Дли-

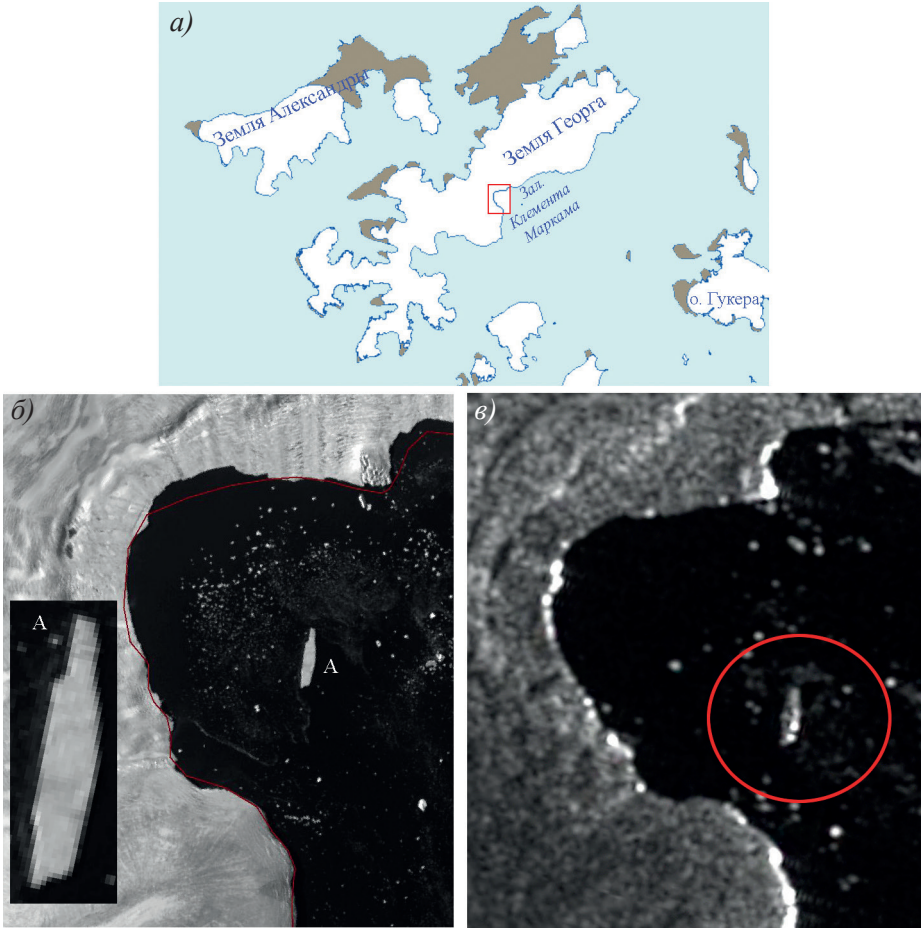

Рис. 4. Наиболее крупный айсберг, длиной 842 м, наблюдавшийся по спутниковым данным у Земли Франца-Иосифа в 2015–2022 гг.:

а — карта-схема западной части архипелага Земля Франца-Иосифа, красным прямоугольником отмечено положение фрагментов спутниковых снимков; *б* — фрагмент снимка Landsat-8, 5 августа 2022 г., на врезке — увеличенный фрагмент снимка с айсбергом (А); *в* — фрагмент снимка Sentinel-1, 3 августа 2022 г.

Fig. 4. The largest iceberg with a length of 842 m, observed by satellite data near Franz Josef Land in 2015–2022:

a — a map of the western part Franz Josef Land. The position of the fragments of the satellite images is indicated by a red rectangle; *б* — a fragment of the Landsat-8 image, 5 August 2022. In the inset to Fig. an enlarged fragment of a satellite image with an iceberg; *в* — a fragment of the Sentinel-1 image, 3 August, 2022

на самых больших айсбергов, отколовшихся от шельфового ледника, в несколько раз превышает длину наиболее крупных айсбергов, образовавшихся от выводных ледников архипелага (она не превышает 1,5 км). Расположенные во фьорде Матусевича острова затрудняют выход крупных айсбергов в море, поэтому часть из них циркулирует в самом фьорде по несколько лет. Со временем такие крупные айсберги под воздействием волнения и ветра дробятся на более мелкие, которые и выходят из фьорда, дрейфуя в разных направлениях, некоторые из них достигают пролива Вилькицкого.

На рис. 3*б* показано изменение в 2012–2022 гг. длины наибольшего из айсбергов, обнаруженного за каждый год наблюдения на спутниковых снимках в районе Северной Земли. В 2012, 2013, 2015–2020 гг. самые крупные айсберги откалывались от шельфового ледника. В 2014, 2018, 2019, 2021, 2022 гг., когда шельфовый ледник был относительно стабилен, образование наиболее крупных айсбергов фиксировалось в других районах: в 2018 и 2019 гг. — у ледника № 12 в проливе Красной Армии [14], в 2021 г. — у ледника Исследователей во фьорде Матусевича, в 2014 и 2022 гг. — у выводного ледника восточного склона ледникового купола Академии наук.

В районе Земли Франца-Иосифа пространственные размеры наиболее крупных айсбергов, обнаруженных по спутниковым данным видимого диапазона за летне-осенний период 2015–2022 гг., в течение периода возрастали. В начале наблюдений айсберги с длиной более 250 м наблюдались редко и, как правило, находились на мелководье. В 2020–2021 гг. были зафиксированы айсберги длиной более 350 м, самый большой айсберг, обнаруженный по снимкам Sentinel-1 у ЗФИ в 2021 г., имел длину 610 м. Еще больший айсберг, длиной 842 м, наблюдался в 2022 г. на снимке Landsat-8 у ледника № 98 в заливе Клемента Маркама (рис. 4). Средняя длина айсбергов, обнаруженных на снимках, составила 157 м.

У баренцевоморского побережья Новой Земли по спутниковым данным видимого диапазона за 2014–2022 гг. наибольшие айсберги обнаружены в 2018 г.: айсберг 298×193 м у ледника Иностранцева (снимок за 9 июля) и айсберг 280×115 м у ледника Кривошеина (снимок за 23 сентября). В 2014, 2015 и 2021 гг. длина обнаруженных айсбергов не достигала 200 м. В 2016 и 2019 гг. максимальная длина айсберга составила 215 м, в 2017 г. — 225 м, в 2020 г. — 207 м.

Изменение количества айсбергов, ежегодно откалывающихся от ледников

По материалам радиолокационной съемки за лето 2015–2021 гг. района Земли Франца-Иосифа со спутника Sentinel-1 было проведено сравнение количества ежегодно образующихся в этом районе айсбергов. Полученные результаты показаны на рис. 3*в*. За 7 лет наблюдений лишь в 2019 г. лед присутствовал в проливах до середины августа, из-за чего идентификация айсбергов осложнялась. В результате в этот год было обнаружено лишь 2626 айсбергов, что практически в два раза меньше, чем в другие годы. Для одного и того же района использовались в основном снимки, разнесенные по времени на 1 месяц. Опыт показывает, что в течение этого периода айсберги летом тают, сокращаются в размерах и разрушаются. Максимальное количество обнаруженных по снимкам айсбергов в районе ЗФИ, зарегистрированное в рекордно теплом 2020 г., составило 6605 при среднем ежегодном значении 5427.

Для оценки количества ежегодно откалывающихся от ледников западного побережья Новой Земли айсбергов за лето 2014–2021 гг. использованы снимки видимого диапазона Landsat-8 и Sentinel-1. Количество обнаруженных айсбергов изменялось от

429 в 2014 г. до 1388 в 2015 г. (рис. 3*в*). В 2014 г. из-за неблагоприятных облачных условий удалось подобрать только 5 информативных спутниковых снимков — вдвое меньше, чем в среднем за год. Недостаточное количество съемочных кадров привело к значительному снижению количества обнаруженных айсбергов на снимках 2014 г. по сравнению с другими годами периода наблюдений.

Исследования количества айсбергов, ежегодно образующихся весной у Северной Земли, были проведены по снимкам оптико-электронной аппаратуры спутника Landsat-8 за 2017–2023 гг. В итоге, при среднем значении количества наблюденных айсбергов 4362, минимальное количество айсбергов было зафиксировано в 2017 г. и составило 2907. Максимум обнаруженных айсбергов, 7974 шт., наблюдался весной 2021 г., т. е. пик айсберговой продуктивности также пришелся на рекордно теплый 2020 г. (рис. 3*в*). Для сравнения на графике показано также число айсбергов, обнаруженных в этом районе исполнителями проекта MAIRES в 2012 г. [5].

В общем числе айсбергов, обнаруженных у Северной Земли весной 2021 г. после рекордно теплого 2020 г., 76 % составляют мелкие (менее 60 м), 19,3 % — средние (61–120 м), 4,3 % — крупные (121–200 м) и 0,3 % — обширные (более 200 м) (рис. 5). В другие годы наблюдений из рассматриваемого периода мелких айсбергов у Северной Земли было зарегистрировано около 50 %, а средних — около 30 %. У Новой Земли максимальный процент мелких айсбергов был зафиксирован также в рекордный 2020 г.: 62,4 %; в остальные годы мелкие айсберги составляли в этом районе 40–44 %.

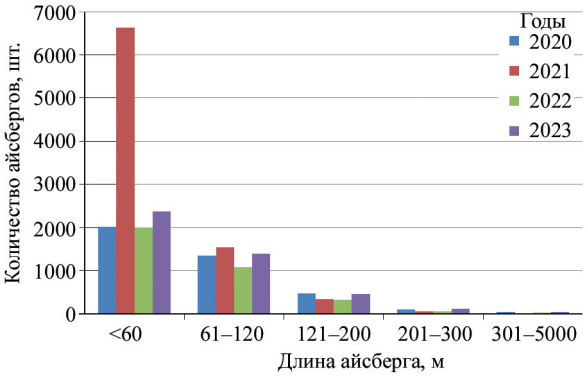

Рис. 5. Распределение по размерам айсбергов, образовавшихся в 2020–2023 гг. у ледников Северной Земли

Fig. 5. Distribution by size of icebergs formed in 2020–2023 near the glaciers of the Novaya Zemlya

Обширных айсбергов (свыше 200 м) весной 2021 г. было обнаружено лишь 27 штук (0,3 %), в то время как в 2023 г. таких айсбергов было зарегистрировано 170 (3,3 %). Такая разница в результатах может быть связана с разной площадью припая у восточного побережья Северной Земли в эти годы. В 2023 г. площадь припая была больше, чем в 2021 г., и зимой 2020/21 г. в припае застряло больше айсбергов, дрейфовавших мористее от мест образования (рис. 6). Соответственно при таянии припая весной риск айсберговой опасности в районе сосредоточения многочисленных припайных айсбергов резко возрастет, так как эти айсберги начнут свободно дрейфовать.

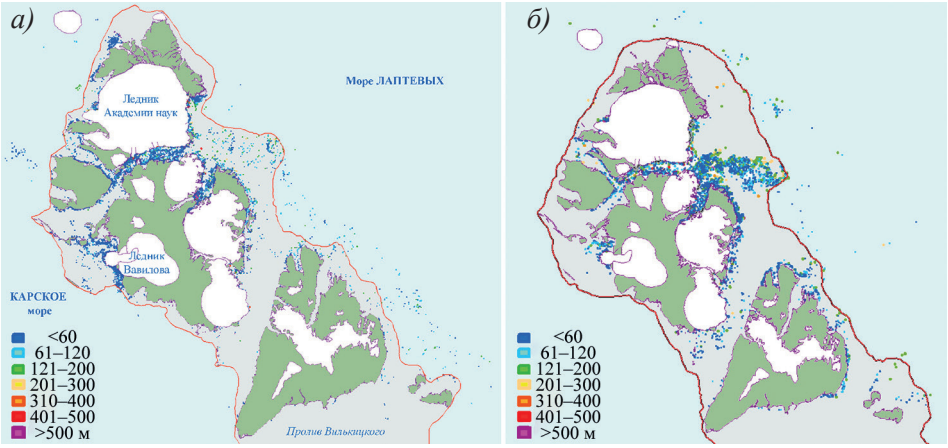

Рис. 6. Местоположение и размеры айсбергов, обнаруженных по спутниковым данным видимого диапазона Landsat-8 в районе Северной Земли весной 2021 (а) и 2023 (б) гг. Красной линией показана граница припая

Fig. 6. Location and dimensions of icebergs detected by satellite data in the area of the Land archipelago in the spring season of 2021 (a) and 2023 (б). The red line shows the fast ice boundary

Выводы

По данным спутниковых наблюдений айсберговая опасность в морях Арктической зоны в последнее десятилетие, в условиях современных климатических изменений, возросла. Фиксируется увеличение количества ежегодно образующихся айсбергов и увеличение их максимальных размеров, тем самым возрастает риск столкновения судов и инженерных объектов на шельфе с такими опасными ледяными образованиями.

Для всех исследованных районов Российской Арктики в период 2012–2022 гг. отмечено увеличение максимальных размеров айсбергов, откалывающихся от ледников. Длина наибольшего айсберга, зафиксированного у Северной Земли, составила 5 км, у Земли Франца-Иосифа — 842 м, у Новой Земли — 298 м.

Процесс айсбергообразования на шельфовом леднике и выводных ледниках с плавучей краевой частью интенсифицируется при повышенных летних температурах приповерхностного воздуха. В аномально теплый 2020 г. от ледников Российской Арктики, по спутниковым данным, откололось свыше 15 тыс. айсбергов, что почти на 5 тыс. выше, чем в остальные годы рассмотренного периода. Наибольший вклад в образование айсбергов вносят ледники Северной Земли, в 2020 г. в этом районе Арктики образовалось, по спутниковым данным, около 8 тысяч айсбергов.

Для достоверных выводов о тенденциях изменения статистических характеристик айсбергов в арктических морях необходима организация постоянного мониторинга районов айсбергообразования, расположенных у выводных ледников. Осуществить такой мониторинг в труднодоступных районах Арктики можно только с помощью спутниковых данных.

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. Шапошников В.М., Александров А.В., Матанцев Р.А., Ивановская О.Д. Анализ айсберговой опасности на Северном морском пути на примере газовозов. *Арктика: экология и экономика*. 2017;(2):76–81. https://doi.org/ 10.25283/2223-4594-2017-2-76-81

   Shaposhnikov V.M., Aleksandrov A.V., Matantsev R.A., Ivanovskaya O.D. Iceberg risk analysis for the Northern sea route: LNG carrier study case. *Arctic: ecology and economy*. 2017;(2):76–81. (In Russ.). https://doi.org/10.25283/2223-4594-2017-2-76-81

2. Фильчук К.В., Коробов В.Б., Юлин А.В., Шевелева Т.В. Влияние наблюдаемых изменений климатических условий на хозяйственную деятельность в морях Российской Арктики. *Российская Арктика*. 2022;(17):21–33. https://doi.org/10.24412/2658-4255-2022-2-21-33

   Filchuk K.V., Korobov V.B., Yulin A.V., Sheveleva N.V. Influence of climate changes on navigation and development of the continental shelf in the Russian Arctic seas. *Russian Arctic*. 2022;(17):21–33. (In Russ.). https://doi.org/10.24412/2658-4255-2022-2-21-33

3. Павлова Е.А., Алексеева Т.А., Миронов Е.У., Смоляницкий В.М. Особенности распределения айсбергов по данным судовых наблюдений в Карском море в 2004–2019 гг. *Российская Арктика*. 2020;(10):30–36. https://doi.org/10.24411/2658-4255-2020-12103

   Pavlova E.A., Alekseeva T.A., Mironov E.U., Smolyanitsky V.M. Specific features of iceberg distribution according to shipborne observations in the Kara Sea in 2004-2019. *Russian Arctic*. 2020;(10):30–36. (In Russ.). https://doi.org/10.24411/2658-4255-2020-12103

4. Abramov V. *Atlas of Arctic icebergs: the Greenland, Barents, Kara, Laptev, East-Siberian and Chukchi seas and the Arctic basin*. NJ, USA: Backbone Publishing company; 1996. 70 p.

5. *MAIRES. Monitoring Arctic Land and Sea Ice using Russian and European Satellites*. Seventh Framework Programme FP7-SPACE-2010-1. EU-Russia Cooperation in GMES (SICA). Grant agreement no. 263165. D5.1: Iceberg map from satellite data. 2014. 18 p.

6. Кучейко А.А., Иванов А.Ю., Давыдов А.А., Антонюк А.Ю. Дрейф и распределение айсбергов в проливе Бориса Вилькицкого по данным детальных радиолокационных и оптических спутниковых изображений. *Исследование Земли из космоса*. 2015;(5):73–83. https://doi.org/10.7868/S0205961415040065

   Kucheiko A.A., Ivanov A.Yu., Davydov A.A., Antonyuk A.Yu. Drift and distribution of icebergs in the Vilkitsky Strait studied by detailed satellite radar and optical images. *Izv. Atmos. Ocean. Phys*. 2016;52:1031–1040. https://doi.org/10.1134/S0001433816090164

7. Бычкова И.А., Смирнов В.Г. Использование спутниковой информации для обнаружения айсбергов и оценки айсберговой угрозы. *Лед и снег*. 2018;58(4):537–551. https://doi.org/10.15356/2076-6734-2018-4-537-551

   Bychkova I.A., Smirnov V.G. Use of satellite data for detecting icebergs and evaluating the iceberg threats. *Ice and Snow*. 2018;58(4): 537–551. (In Russ.). https://doi.org/10.15356/2076-6734-2018-4-537-551

8. *WMO Sea-ice nomenclature*. WMO. No. 259, Vol. 1 — Terminology and Codes. Edition 1970–2019.

9. Жичкин А.П. Ледовые условия в районе архипелага Земля Франца-Иосифа. *Труды Кольского научного центра РАН*. 2014;(4): 82–89.

   Zhichkin A.P. Ice conditions in the Franz Josef Land archipelago. *Proc. of Kola Science Center RAS*. 2014;(4): 82–89. (In Russ.)

10. 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., Шибакин С.И. Айсберги и ледники Баренцева моря: Исследования последних лет. Ч. 1. Основные продуцирующие ледники, распространение и морфометрические особенности айсбергов. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2008;78(1): 66–79.

    Buzin I.V., Glazovsky A.F., Gudoshnikov Yu.P., Danilov A.I., Dmitriev N.E., Zubakin G.K., Kubyshkin 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 = Problems of Arctic and Antarctic*. 2008;78(1):66–79. (In Russ.)

11. Большиянов Д.Ю., Соколов В.Т., Ёжиков И.С., Булатов Р.К., Рачкова А.Н., Федоров Г.Б., Парамзин А.С. Условия питания и изменчивость ледников архипелага Северная Земля по результатам наблюдений 2014–2015 гг. *Лед и снег*. 2016;56(3):358–368. https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-3-358-368

    Bolshiyanov D.Y., Sokolov V.T., Yozhikov I.S., Bulatov R.K., Rachkova A.N., Fedorov G.B., Paramzin A.S. Conditions of the alimentation and the variability of glaciers of the Severnaya Zemlya Archipelago from observations of 2014–2015. *Ice and Snow*. 2016;56(3):358–368. (In Russ.). https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-3-358-368

12. Алексеев Г.В., Александров Е.И., Иванов Н.Е. Особенности климата Арктики в 2020 году. *Российские полярные исследования*. 2021;(1): 11–14.

13. Алексеев Г.В., Иванов Н.Е., Вязилова А.Е., Радионов В.Ф., Смоляницкий В.М. Мониторинг климата Арктики в 2022 году. *Российские полярные исследования*. 2023;(1): 10–12.

14. Бычкова И.А., Смирнов В.Г. Сравнительный анализ выводных ледников Северной Земли как источников формирования айсбергов, по спутниковым данным 2014–2019 гг. *Лед и снег*. 2021;61(1):14–25. https://doi.org/10.31857/S2076673421010068

    Bychkova I.A., Smirnov V.G. Estimation of the volume of icebergs calved from the outlet glaciers of the Severnaya Zemlya archipelago for 2014–2019. *Ice and Snow*. 2021;61(1):14–25. (In Russ.). https://doi.org/10.31857/S2076673421010068

Оригинальная статья / Original paper
https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-1-87-102
УДК 551.326.032

Метод краткосрочного прогноза преобладающей ориентации разрывов в ледяном покрове моря Лаптевых в зимне-весенний период

Л.Н. Дымент✉, А.А. Ершова, В.С. Порубаев

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

✉*ldyment@aari.ru*

ЛНД, 0000-0002-3412-922X; ААЕ, 0009-0006-6545-3635; ВСП, 0000-0003-2941-9772

Аннотация. Разработан способ прогнозирования преобладающей ориентации разрывов в ледяном покрове моря Лаптевых по прогностическим полям атмосферного давления с заблаговременностью до 3 суток на основе метода аналогов. При составлении прогноза используются ретроспективные данные атмосферного давления, дрейфа льда OSI SAF и разрывов, полученные при дешифрировании снимков искусственных спутников Земли SuomiNPP. Изложены алгоритмы для автоматизации процесса составления прогноза по разработанному методу. Сравнение результатов оправдываемости прогностических значений модальной ориентации разрывов, полученных при применении климатического, инерционного и разработанного методов прогноза, выявило высокую эффективность последнего в случаях перестройки поля атмосферного давления.

Ключевые слова: воздушные потоки, дрейф льда, метод аналогов, модальная ориентация, нарушения сплошности льда, оправдываемость прогноза, спутниковые снимки, эллипс деформации

Для цитирования: Дымент Л.Н., Ершова А.А., Порубаев В.С. Метод краткосрочного прогноза преобладающей ориентации разрывов в ледяном покрове моря Лаптевых в зимне-весенний период. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2024;70(1):87–102. https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-1-87-102

Поступила 02.11.2023 **После переработки 19.12.2023** **Принята 27.12.2023**

Short-term forecasting method for prevailing orientation of leads in the Laptev Sea ice cover during winter-spring season

Liudmila N. Dyment✉, Anastasiia A. Ershova, Viktor S. Porubaev

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

✉ldyment@aari.ru

LND, 0000-0002-3412-922X; AAE, 0009-0006-6545-3635; VSP, 0000-0003-2941-9772

Abstract. Sea ice leads are potential routes of easier navigation in the Arctic seas during winter-spring season. Forecasts of the prevailing orientation of ice leads are required for the early selection of the optimal route of a ship in ice. An automated method for short-term forecasting of the prevailing orientation of leads in the Laptev Sea is developed in AARI based on the analog method. Data sources for making a forecast include predictive fields of atmospheric pressure up to 3 days in advance and historical data on surface atmospheric pressure, ice drift and sea ice leads. The data on ice leads are obtained by interpreting SuomiNPP satellite images in a visible and infrared range at 375 m spatial resolution for the cold seasons 2016–2022. The ice drift data are freely available OSI SAF data. In order to make a forecast of the prevailing orientation of leads by a predictive atmospheric pressure field, it is necessary to select from an electronic data archive a historical field of atmospheric pressure that is the most similar to the predictive field. The lead characteristics on the selected date are taken as the predictive ones. Automated selection of an analog consists in searching for an atmospheric pressure field from the electronic data archive which has minimal metrics for the forecast date together with 2 previous days. The metric is calculated as the sum of the squared differences between the change in atmospheric pressure per 1 km in the latitudinal and meridional directions between the predictive atmospheric pressure field and the potential analog field. Actual lead data for a date of the selected analog may not be available due to thick clouds. In this case, the direction of the minor axis of the strain ellipse calculated from ice drift data is taken as the prevailing orientation of leads. The success ratio of diagnostic forecasts by the method developed is 72 %. Comparison of the success ratio of the diagnostic forecasts with the results of inertial and climatic forecasts demonstrates a high effectiveness of the method for cases of abrupt change in the direction of air flows over the Laptev Sea within the first 1–2 days.

Keywords: air flows, analog method, forecast verification, ice discontinuities, ice drift, modal orientation, satellite images, strain ellipse

For citation: Dyment L.N., Ershova A.A., Porubaev V.S. Short-term forecasting method for prevailing orientation of leads in the Laptev Sea ice cover during winter-spring season. *Arctic and Antarctic Research*. 2024;70(1):87–102. (In Russ.). https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-1-87-102

Received 02.11.2023 **Revised 19.12.2023** **Accepted 27.12.2023**

Введение

Разрывы представляют собой трещины, каналы и разводья с открытой водой или покрытые льдом не старше молодого. Они являются характерным элементом ландшафта дрейфующего морского ледяного покрова в холодный период года. Протяженность разрывов в зимний период может достигать несколько сотен километров и более, а ширина — от нескольких метров до нескольких километров.

Практический интерес к разрывам вызван возможностью их использования в навигации. Являясь потенциальными маршрутами более легкого плавания, разрывы используются при проводке транспортных судов ледоколами в зимне-весенний период в арктических морях и плавании ледоколов в Арктическом бассейне.

При планировании и реализации морских операций в зимне-весенний период наибольший интерес представляют сведения о попутных разрывах, преобладающее направление которых совпадает с генеральным курсом движения судна или несущественно отличается от него. Использование судоводителями попутных разрывов позволяет увеличить среднюю скорость движения судна более чем в 2 раза по сравнению с ее значениями в зонах льда со сплоченностью 10 баллов и полным отсутствием разрывов [1]. Следовательно, чем больше протяженность пути судна по разрывам, тем меньше временные затраты плавания во льдах и тем выше его безопасность. Таким образом, учет преобладающей ориентации разрывов необходим при выборе оптимального маршрута следования в арктических морях в холодный период года для повышения экономической эффективности судоходства по трассе Северного морского пути (СМП).

Потребность в заблаговременном выборе оптимального маршрута следования судов во льдах с учетом попутных разрывов обуславливает необходимость составления прогнозов преобладающей ориентации разрывов и зон их образования при навигации по СМП в зимне-весенний период.

Проведенные в ААНИИ попытки составления численных прогнозов характеристик разрывов на основе моделей краткосрочного прогноза дрейфа льда оказались неудачными. Несмотря на то, что неравномерность скорости дрейфа льда, возникающая под действием ветра, является основной причиной образования разрывов [2], она не является единственной. На образование разрывов в ледяном покрове влияют дополнительные факторы, такие как приливные явления [3], рельеф дна и береговой черты [4, 5], наличие островов. Учесть все это позволяют аналоговые методы составления прогноза.

Суть аналогового метода прогноза преобладающей ориентации разрывов заключается в подборе по ретроспективным данным срочных полей атмосферного давления, которые в пределах рассматриваемой акватории имеют по структуре максимальное сходство с прогностическим. Такое сходство предполагает совпадение направления воздушных потоков и значений градиента давления, подобие в расположении зон повышенного и пониженного давления и совпадение центров циклонической и антициклонической циркуляций при их нахождении над акваторией моря. Поле атмосферного давления из архива, имеющее наибольшее сходство с прогностическим, принимается за аналоговое. При этом предполагается, что и прогностические значения характеристик разрывов будут близкими к соответствующим значениям, рассчитанным за дату подобранного аналога. Правомерность такого подхода обоснована результатами ранее выполненных исследований [6].

В настоящий момент имеются неавтоматизированные, требующие модернизации методы среднесрочного прогноза преобладающей ориентации разрывов с заблаговременностью от 4 до 6 суток в Арктическом бассейне [7] и в Карском море [8]. Для других морей, через которые проходит СМП, методов прогноза преобладающей ориентации разрывов не существует.

План развития СМП как важной транспортной артерии России предусматривает развитие круглогодичной навигации во всех арктических морях.

Целью нашей работы являлась разработка автоматизированного метода краткосрочного прогноза преобладающей ориентации разрывов в море Лаптевых в зимне-весенний период. Для создания метода требовалось адаптировать аналоговый метод прогноза к акватории моря Лаптевых и разработать алгоритмы для программного обеспечения (ПО), позволяющего автоматизировать самые трудоемкие этапы составления прогноза.

Разработка автоматизированного метода прогноза

Исходные данные

Для получения информации о разрывах использовались находящиеся в свободном доступе снимки искусственных спутников Земли (ИСЗ) SuomiNPP, производящие съемку ледяного покрова в видимом и инфракрасном диапазонах. Достаточно широкая полоса обзора позволяет охватить всю акваторию моря Лаптевых одним снимком. Пространственное разрешение этих снимков составляет 375 м, поэтому получаемые фактические данные относятся только к крупным разрывам, ширина

которых не менее пространственного разрешения снимка ИСЗ. Однако ранее выполненные исследования показали, что преобладающее направление у крупных и у более мелких разрывов совпадает [9, 10].

В настоящее время существуют методы автоматической идентификации разрывов на снимках ИСЗ видимого и ИК диапазонов [11–14]. К сожалению, ни один из них не пригоден для наших целей. Некоторые из них не позволяют определить ориентацию разрывов в пространстве, другие не являются достаточно надежными, т. к. при их применении для автоматического дешифрирования фиксируются ложные разрывы, а часть существующих в действительности игнорируется. Поэтому для формирования электронного архива разрывов в море Лаптевых, который послужит основой для разработки метода прогноза, дешифрирование и оцифровка разрывов на снимках ИСЗ проводились экспертом вручную посредством ГИС. В отличие от автоматической идентификации объектов ледяного покрова, при которой еще на начальном этапе отсекаются зоны, расположенные под маской облачности, эксперт способен увидеть разрывы в ледяном покрове и сквозь легкую облачность. В ходе обработки каждого снимка эксперт фиксирует географические координаты концов каждого относительно прямолинейного отрезка разрыва, т. е. участка разрыва, в пределах которого его ориентация визуально не меняется. Результаты оцифровки заносятся в электронный архив, по данным которого можно рассчитать как ориентацию в пространстве каждого отдельного разрыва, так и преобладающую ориентацию в произвольно выбранной области. К настоящему моменту в электронный архив занесены данные о разрывах в море Лаптевых с 325 снимков ИСЗ за период 2016–2022 гг.

При разработке метода прогноза преобладающей ориентации разрывов в море Лаптевых также использовались ретроспективные данные приземного атмосферного давления и дрейфа льда за 2016–2022 гг. В качестве исходных данных для полей дрейфа льда использовались данные OSI SAF [15], представляющие собой осредненные за 48 часов векторы скорости дрейфа льда в узлах полярной стереографической сетки, охватывающей весь Северный Ледовитый океан, с шагом 62,5 км. Эта информация находится в свободном доступе и обеспечивает полное покрытие данными исследуемой акватории за счет интерполяции отсутствующих векторов из соседних.

Использование при составлении прогнозов исходных данных о разрывах и дрейфе льда за предыдущие 7 лет позволяет избежать дополнительных погрешностей, связанных с климатическими изменениями, происходящими в последние десятилетия.

Автоматизированный подбор аналогов

Для автоматизации процесса подбора аналога прогностического поля атмосферного давления требовалось определить такой критерий, который бы позволял количественно оценить сходство двух полей давления, представленных значениями в узлах географической сетки. Для этого было необходимо сформировать некоторый набор численных значений, который бы описывал структуру произвольного поля атмосферного давления. В качестве такого набора была принята матрица изменения атмосферного давления на 1 км в широтном и меридиональном направлении. При формировании такой матрицы рассчитывались отношения разности атмосферного давления Δp_i в соседних узлах географической сетки к расстоянию между этими узлами r_i.

Матрица изменения атмосферного давления в полной мере отражает структуру поля атмосферного давления, т. к. она характеризует и направление ветровых по-

токов, и их интенсивность. Для примера рассмотрим однонаправленный воздушный поток южного направления, сформированный полем атмосферного давления, приведенным на рис. 1*а*. Изменение значений давления в двух соседних узлах в меридиональном направлении в этом случае будет близко к нулю, а в широтном направлении соответствующие значения будут отличными от нуля, при этом чем выше интенсивность воздушного потока, тем больше будут значения Δp_i по модулю. При северном направлении воздушных потоков значения Δp_i в широтном направлении будут иметь противоположный знак, а в меридиональном направлении также будут по модулю близки к нулю. Наличие в поле атмосферного давления циклонического вихревого образования, пример которого приведен на рис. 1*б*, будет характеризоваться близкими к нулю значениями Δp_i как в широтном, так и в меридиональном направлении в районе его центра и отличными от нуля в остальных узлах сетки. При этом направление и интенсивность потока будут выражаться знаком и абсолютным значением Δp_i.

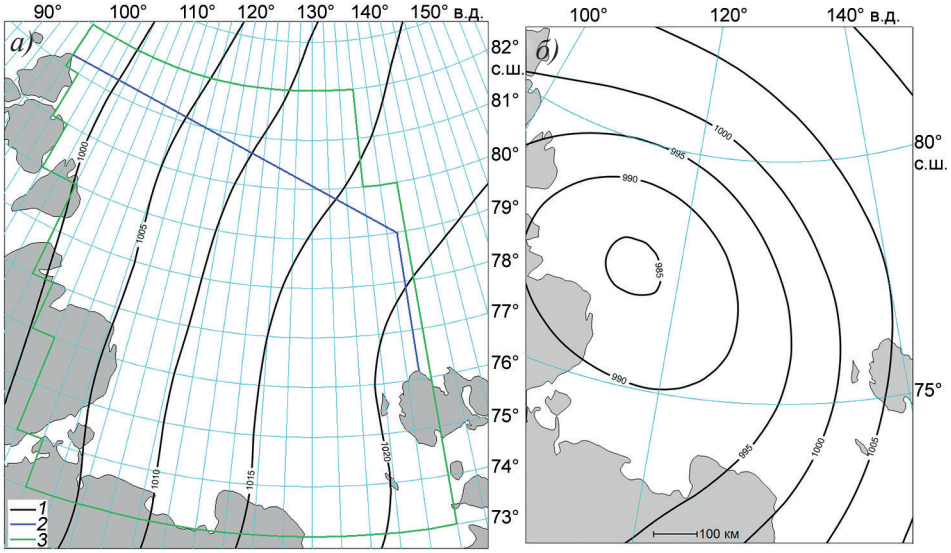

Рис. 1. Поля атмосферного давления в море Лаптевых 1 апреля 2019 г. (*а*) и 1 мая 2018 г. (*б*)
1 — изобары, гПа; *2* — граница моря Лаптевых; *3* — граница зоны расчета

Fig. 1. Atmospheric pressure fields, Laptev Sea, April 1, 2019 (*a*) and May 1, 2018 (*б*)
1 — isobar, hPa; *2* — boundary of the Laptev Sea; *3* — boundary of the area of calculation

При расчете матрицы изменения атмосферного давления использовались его значения в узлах географической сетки с шагом 1° по широте и 2° по долготе. Зона расчета включала в себя все узлы сетки в пределах акватории моря Лаптевых, а также дополнительные узлы, расположенные к северу и северо-востоку от его границы (см. рис. 1*а*). Выбор дополнительных узлов был обусловлен следующими соображениями. Западная и южная границы моря Лаптевых являются естественными, т. е. представляют собой береговую черту, а в зимне-весенний период — границу припая. С севера и северо-востока море Лаптевых является открытым, и атмосфер-

ные процессы, существующие за его условной северной границей, могут оказывать влияние на дрейф льда в пределах акватории моря.

Возможность количественно описать структуру поля атмосферного давления позволила перейти к определению количественной меры сходства двух полей атмосферного давления. В качестве такой меры была принята метрика *d*, выражаемая формулой (1).

$$d^2 = \sum_{i=1}^{n} \left[\frac{\left(\Delta p_i^f - \Delta p_i^a \right)}{\overline{\Delta p^f} \cdot r_i} \right]^2 . \qquad (1)$$

В формуле (1) r_i — расстояние между узлами *i* и *i* + *1* в километрах, $\overline{\Delta p^f}$ — среднее значение изменения атмосферного давления на 1 км в прогностическом поле атмосферного давления. Величина $\overline{\Delta p^f}$ используется для нормирования.

В ходе расчета метрики происходит сопоставление соответствующих значений матриц изменения атмосферного давления в двух сравниваемых полях атмосферного давления, в качестве одного из которых выступает прогностическое поле $\left(\Delta p_i^f \right)$, а второе поле является «претендентом» на статус аналога к нему $\left(\Delta p_i^a \right)$. Чем меньше значение метрики *d*, тем меньше различие между двумя сравниваемыми полями атмосферного давления.

По сути, метрика *d* является евклидовым расстоянием, которое используется в кластерном анализе для группировки объектов. В данном случае в качестве «свойств» объекта выступают значения изменения атмосферного давления между двумя фиксированными точками на акватории моря Лаптевых Δp_i.

При формировании матрицы изменения атмосферного давления при указанном выше шаге по широте и долготе в море Лаптевых используется 350 пар узлов, т. е. значение *n* в формуле (1) равно 350.

В процессе подбора аналога к прогностическому полю атмосферного давления последовательно рассчитывается метрика за каждый день ледовых сезонов 2016–2022 гг. За аналог принимается поле атмосферного давления, соответствующее минимальному значению метрики при его сравнении с прогностическим.

Подобрать аналог к прогностическому полю в пределах всего моря удается не всегда. Если после перебора всех ретроспективных полей атмосферного давления минимальное полученное значение метрики тем не менее оказывается слишком большим, следует уменьшить размер области сравнения с акватории всего моря до его северной и южной или западной и восточной частей. Подбор аналога отдельно для каждой из частей моря позволяет в большинстве случаев уменьшить значение метрики. В этом случае итоговый аналог формируется из двух отобранных полей. При раздельном подборе аналогов для северной и южной частей моря Лаптевых границей между ними принята параллель 77° с. ш. При этом расчет метрики для северной части проводится по 200 значениям Δp, а для южной — по 150. При раздельном подборе аналогов для западной и восточной частей моря Лаптевых в качестве границы принят меридиан 120° в. д. в северной части моря и 124° в. д. в южной. Расчет метрики для западной части моря Лаптевых проводится по 185 значениям Δp, а для восточной — по 165.

Если интенсивность воздушных потоков в прогностическом поле атмосферного давления существенно различается в северной и южной или в западной и восточной частях моря, подбор аналога также проводится отдельно для каждой из частей моря.

Расчет прогностических значений преобладающей ориентации разрывов

Ретроспективные фактические данные о разрывах за дату подобранного аналога используются для последующего расчета преобладающей ориентации разрывов, которая принимается за прогностическую. Однако за дату аналога могут отсутствовать фактические данные о разрывах из-за невозможности дешифрирования НСЛ на снимке ИСЗ вследствие плотной облачности. В этом случае, согласно ранее проведенным в ААНИИ исследованиям [6, 16], в качестве преобладающей ориентации разрывов можно использовать расчетное направление малой оси эллипса скорости деформации ледяного покрова, рассчитываемого по полю скорости дрейфа льда.

Ранее предполагалось, что расчет ориентации разрывов следует производить по данным дрейфа льда за дату подобранного аналога, однако анализ результатов выполненных расчетов выявил низкую оправдываемость такого подхода.

Проведенные авторами исследования позволили установить, что при малоградиентном поле атмосферного давления, достаточно часто формирующемся над морем Лаптевых, образование новых разрывов не происходит. Расчет преобладающей ориентации разрывов по данным дрейфа, соответствующим такому полю давления, не совпадает с фактическими данными, т. к. в этом случае в ледяном покрове присутствуют разрывы, сформированные ранее при более интенсивном дрейфе. Также было установлено, что циклон, центр которого находится в пределах акватории моря Лаптевых, даже при малоградиентном поле давления приводит к формированию системы разрывов. Система разрывов может сохраняться длительное время, пока ее не изменит другой интенсивный воздушный поток.

Инерционность локализации и ориентации разрывов, а также выявленные закономерности их поведения в зависимости от изменения интенсивности и направления воздушных потоков легли в основу алгоритма определения даты образования существующей в заданный момент системы разрывов в море Лаптевых и, соответственно, даты поля дрейфа льда, приведшего к ее возникновению. Данные дрейфа льда OSI SAF за установленную дату используются для расчета преобладающей ориентации разрывов при отсутствии фактических данных о НСЛ. Подробно основы разработанного алгоритма и способ его реализации изложены в [17]. Здесь лишь отметим, что для моря Лаптевых система разрывов, полученная по данным ИСЗ на конкретный момент времени, в подавляющем большинстве случаев сформирована полем дрейфа в один из предыдущих дней.

При составлении прогнозов в качестве преобладающего направления разрывов использовалась их модальная ориентация. Модальная ориентация разрывов представляет собой направление, в диапазоне ±20° от которого суммарная протяженность разрывов в зоне расчета является наибольшей. Если в рассматриваемой зоне выделяется два близких по значимости направления разрывов, то распределение ориентации считается двумодальным. Расчет модальной ориентации разрывов осуществлялся по квадратам 100×100 км, на которые была разбита акватория моря Лаптевых. Выбор размера квадрата сетки был обусловлен количеством имеющейся исходной информации о разрывах.

Составление диагностических прогнозов

Проверка метода осуществлялась посредством диагностических прогнозов. При составлении диагностических прогнозов в качестве прогностического поля атмосферного давления выбирается одно из ретроспективных полей, за дату которого имеются данные о разрывах в электронном архиве. Это дает возможность сопоставить результаты составленного прогноза с истинной модальной ориентацией разрывов, т. е. ориентацией, рассчитанной по фактическим данным за дату, принятую за прогностическую. При составлении диагностических прогнозов за прогностические принимались только даты, за которые фактическими данными о разрывах было обеспечено более трети акватории моря.

Для составления прогноза преобладающей ориентации разрывов в море Лаптевых по вышеизложенному алгоритму было разработано специализированное ПО. В результате его работы из срочных данных атмосферного давления за ледовые сезоны 2016–2022 гг. отбиралось по 5 аналогов для каждого из пяти районов: для всей акватории моря Лаптевых и для его северной, южной, западной и восточной частей. Эксперту предоставлялась информация о дате каждого потенциального аналога, величине метрики d, количестве фактических данных о разрывах за дату аналога. Кроме того, эксперт располагал данными о наличии циклона над акваторией моря и существовании различия в интенсивности воздушных потоков в прогностическом поле атмосферного давления в северной и южной или в западной и восточной частях моря. На основании этой информации экспертом принималось решение о возможности использования аналога, подобранного для всего моря целиком, либо мозаики из аналогов, подобранных для частей моря. Установлено, что если в прогностическом поле атмосферного давления над морем Лаптевых располагается центр циклона, то следует подбирать аналог только ко всей акватории моря в целом.

Затем для выбранных районов эксперт выбирал аналог с наименьшим значением метрики. При близких значениях метрики у нескольких аналогов предпочтение отдавалось аналогу, обеспеченному фактическими данными на большей части акватории моря, дата которого относится к тому же сезону, что и дата прогноза.

После принятия экспертом окончательного решения о дате используемого аналога (или двух аналогов в случае выбора расчета по частям) и ввода ее в интерактивном режиме ПО формирует массив прогностических значений модальной ориентации разрывов по квадратам сетки, рассчитанных по фактическим данным о разрывах за дату аналога и дополненных, при необходимости, расчетными значениями по данным дрейфа льда за соответствующую дату. Установлено, что при отсутствии фактических данных о разрывах за дату аналога можно воспользоваться фактическими данными за последующий день (при их наличии), если интенсивность поля атмосферного давления в этот день была низкой.

Результаты составленного прогноза сравнивались с реальными данными путем расчета оправдываемости прогноза. Оправдываемость прогноза — это отношение количества квадратов сетки, в которых прогностическая преобладающая ориентация разрывов отличалась от фактической не более чем на 30°, к общему числу квадратов, по которым составлялся прогноз. Допуск в 30° был принят исходя из [18], согласно которому для краткосрочных прогнозов величина допустимой ошибки не должна превышать 0,674 от ее среднего квадратического отклонения. Опыт ледового плавания также показывает, что разрывы, ориентация которых отклоняется от генерального

Рис. 2. Поля атмосферного давления и модальная ориентация разрывов: *а* — 29 декабря 2017 г. (поле, принятое за прогностическое); *б* — 21 апреля 2020 г. (поле, принятое за аналог); *в* — 28 декабря 2017 г. (поле, предшествующее прогностическому); *г* — 20 апреля 2020 г. (поле, предшествующее аналогу). *1* — изобары, гПа; *2* — модальная ориентация, рассчитанная по фактическим данным о разрывах; *3* — модальная ориентация, рассчитанная на основе данных по дрейфу льда

Fig. 2. Atmospheric pressure fields and modal orientation of leads: *а* — December 29, 2017 (field taken as a prognostic one); *б* — April 21, 2020 (field taken as an analog); *в* —December 28, 2017 (field for a day before prognostic date); *г* — April 20, 2020 (field for a day before analog date). *1* — isobar, hPa; *2* — modal orientation calculated from actual lead data; 3 — modal orientation calculated from ice drift data

курса судна не более чем на 30°, могут считаться попутными и эффективно использоваться в навигации [19].

При составлении диагностических прогнозов были зафиксированы случаи, когда при хорошем аналоге, характеризующемся низким значением метрики, преобладающая ориентация разрывов в даты аналога и прогноза существенно различалась. В примере, представленном на рис. 2, при хорошем показателе сходства атмосферных полей (см. рис. 2*а* и 2*б*) оправдываемость прогноза преобладающей ориентации разрывов по подобранному аналогу низкая: квадраты, в которых различие прогностических и фактических значений модальной ориентации разрывов не превышает 30° (на рис. 2*а* и 2*б* отмечены зеленой заливкой), составляют лишь 40 % от общего количества квадратов, участвующих в диагнозе.

Проведенный анализ фактических данных позволил выявить существование инерции преобладающей ориентации разрывов при смене направления воздушных потоков. Даже при кардинальной смене направления ветровых потоков и высокой их интенсивности значение модальной ориентации разрывов сохранялось в течение суток в пределах допуска не менее чем в 60 % квадратов. При расчете по всем данным электронного архива значения модальной ориентации разрывов за два последовательных дня различались не более чем на 30° в 90 % квадратов. Таким образом, существующая в день прогноза система разрывов чаще всего сформирована под действием полей атмосферного давления в предыдущие дни. Поэтому при подборе аналога необходимо учитывать не только сходство его поля атмосферного давления с прогностическим, но и сходство соответствующих полей за 1–2 предшествующих дня.

В представленном примере (см. рис. 2) в дни, предшествующие датам прогноза и аналога, структура полей атмосферного давления существенно различалась (см. рис. 2*в* и 2*г*).

Учет в процессе выбора аналога сходства полей атмосферного давления не только за дату прогноза, но и за 1–2 предшествующих дня существенно повышает оправдываемость прогнозов. На рис. 3 представлен аналог, подобранный к тому же прогностическому полю атмосферного давления (см. рис. 2*а*) с учетом сходства полей за текущий и предшествующий дни. Оправдываемость прогноза преобладающей ориентации разрывов в этом случае возросла до 85 %.

В настоящее время в алгоритме подбора аналога учитывается сходство полей атмосферного давления с прогностическими в течение трех суток, то есть за дату прогноза и два предшествующих дня. При этом если дате прогноза соответствует малоградиентное поле атмосферного давления, то за прогностическую принимается предшествующая ей дата, т. к. установлено, что малоградиентное поле не формирует новую систему разрывов и преобладающая ориентация разрывов не изменяется.

При вычислении итоговой метрики d^* предварительно по формуле (1) рассчитываются метрики d_1, d_2, d_3 для каждого из трех учитываемых дней. При этом d_1 определяет меру сходства прогностического поля атмосферного давления с полем атмосферного давления за дату потенциального аналога, d_2 — меру сходства поля атмосферного давления за день, предшествующий дате прогноза, с полем атмосферного давления, зафиксированным на 1 день ранее даты потенциального аналога. Соответственно, d_3 — мера сходства двух полей атмосферного давления, существовавших за 2 дня до даты прогноза и даты потенциального аналога.

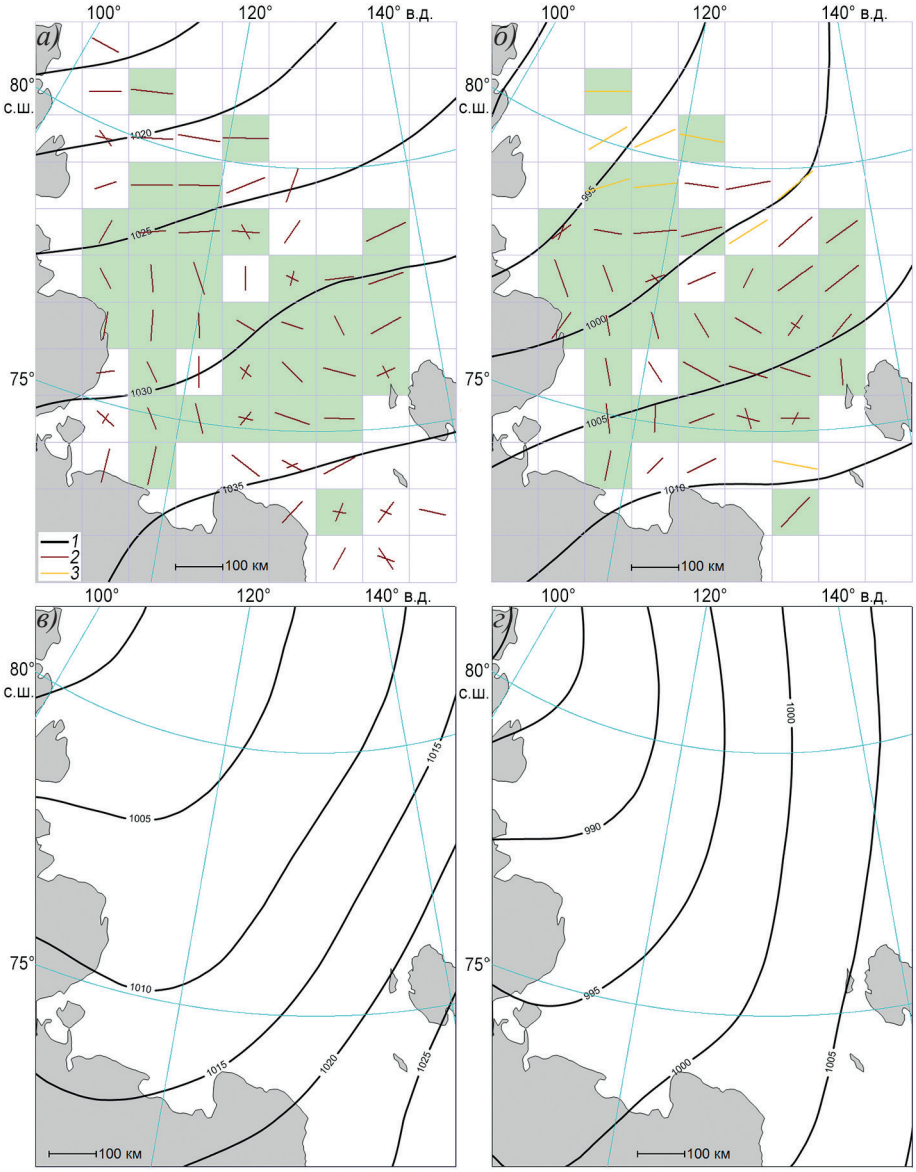

Рис. 3. Поля атмосферного давления и модальная ориентация разрывов: *а* — 29 декабря 2017 г. (поле, принятое за прогностическое); *б* — 14 января 2020 г. (поле, принятое за аналог); *в* — 28 декабря 2017 г. (поле, предшествующее прогностическому); *г* — 13 января 2020 г. (поле, предшествующее аналогу). *1* — изобары, гПа; *2* — модальная ориентация, рассчитанная по фактическим данным; *3* — модальная ориентация, рассчитанная на основе данных по дрейфу льда

Fig. 3. Atmospheric pressure fields and modal orientation of leads: *a* — December 29, 2017 (field taken as a prognostic one); *б* — January 14, 2020 (field taken as an analog); *в* —December 28, 2017 (field for a day before prognostic date); *г* — January 13, 2020 (field for a day before analog date). *1* — isobar, hPa; *2* — modal orientation calculated from actual lead data; *3* — modal orientation calculated from ice drift data

$$d^* = k_1 d_1^2 + k_2 d_2^2 + k_3 d_3^2$$
$$k_i = G_i \Big/ \sum_{i=1}^{3} G_i, \sum_{i=1}^{3} k_i = 1. \qquad (2)$$

Коэффициенты k_1, k_2 и k_3 в формуле (2) обеспечивают учет метрик d_1, d_2, d_3 пропорционально средней интенсивности поля атмосферного давления G за соответствующий день, т. к. чем интенсивнее воздушные потоки, тем большее влияние они оказывают на дрейф льда и, как следствие, на формирование разрывов. Подробно методика количественной оценки интенсивности поля атмосферного давления G приведена в работе [17].

Оправдываемость диагностических прогнозов

По разработанному методу было составлено 80 диагностических прогнозов. Средняя оправдываемость прогноза преобладающей ориентации разрывов составила 72 %. Максимальное значение оправдываемости достигало 95 %, минимальное — 50 %. Для качественной оценки полученного среднего значения оправдываемости его требовалось сопоставить с соответствующими значениями, полученными по другим методам прогноза, а именно по климатическому и инерционному.

Для расчета климатических значений модальной ориентации разрывов мы воспользовались данными, предоставленными [13], полученными в результате распознавания разрывов в ледяном покрове на снимках ИСЗ методом нейронных сетей. Эти данные находятся в свободном доступе и охватывают период с 2002 по 2020 г. Средняя оправдываемость прогнозов, составленных по климатическим данным, оказалась равной 54 %. Столь низкое значение объясняется значительной изменчивостью, свойственной ориентации разрывов в море Лаптевых.

Для определения средней оправдываемости инерционных прогнозов преобладающей ориентации разрывов в море Лаптевых мы воспользовались собственным архивом данных. Инерционность ледовых процессов и присущая морю Лаптевых преимущественно низкая интенсивность воздушных потоков [20] приводят в большинстве случаев к сохранению модальной ориентации разрывов на протяжении нескольких дней. Значимое изменение модальной ориентации разрывов происходит при смене направления воздушных потоков высокой интенсивности, что в море Лаптевых случается не так часто. Поэтому для оценки эффективности разработанного метода по сравнению с инерционным прогнозом были отобраны диагностические прогнозы на даты, накануне которых произошла существенная перестройка поля атмосферного давления и, как следствие, поля дрейфа льда. Таких дней оказалось только 12, т. к. такие ситуации вообще наблюдаются в море Лаптевых достаточно редко [17], и кроме того требовалось выбрать даты, обеспеченные исходными данными о разрывах на большей части акватории моря за 1–2 дня до и после смены направления воздушных потоков значительной интенсивности. В таблице приводятся результаты сравнения оправдываемости прогнозов, составленных по разработанному методу, с климатическими и инерционными прогнозами.

Как видно из данных таблицы, в случае существенного изменения поля атмосферного давления разработанный метод на 20 % эффективнее инерционного прогноза и на 26 % — климатического.

Таблица

Оправдываемость прогнозов модальной ориентации разрывов в случае смены направления воздушных потоков в течение 1–3 суток, %

Table

The accuracy of forecasts of the modal orientation of ruptures in the event of a change in the direction of air flows within 1–3 days, %

Прогноз	Оправдываемость прогноза, %		
	Средняя	Минимальная	Максимальная
По разработанному методу	69	54	80
Климатический	43	29	66
Инерционный	49	28	60

Следует отметить тот факт, что, несмотря на высокую оправдываемость инерционных прогнозов преобладающей ориентации разрывов при сохранении структуры полей атмосферного давления на протяжении нескольких дней, не всегда существует возможность их использовать. Наличие плотной облачности может не позволить дешифрировать разрывы на снимках ИСЗ видимого и ИК диапазонов на дату составления прогноза, хотя с высокой долей вероятности будет известно, что в ближайшие 1–3 дня модальная ориентация разрывов сохранится.

Все составленные диагностические прогнозы модальной ориентации разрывов с низкой оправдываемостью (менее 60 %) были дополнительно проанализированы для выявления причин расчетной ошибки. Выявлено, что наиболее часто низкие значения оправдываемости прогноза соответствовали ситуациям, когда в течение 4 суток и более над морем Лаптевых наблюдалось малоградиентное поле атмосферного давления и система разрывов оставалась неизменной в течение всего этого периода. Как показала практика, подбор аналога к полю атмосферного давления со значимой интенсивностью, но отстоящего от прогностической даты на 5 суток и более приводит к неудовлетворительным результатам прогноза.

Несколько случаев прогнозов с низкой оправдываемостью были выявлены при сохранении в течение трех суток высокой интенсивности воздушных потоков, но при этом ежедневно изменяющих направление. Поскольку интенсивные воздушные потоки на протяжении нескольких дней наблюдаются в море Лаптевых редко, вероятность подбора хорошего аналога из электронного архива в этом случае невелика.

В целом же результат составленного прогноза определяется степенью адекватности подобранного аналога. Чем точнее удается его подобрать, тем меньше различия в направлении и интенсивности воздушных потоков, возникающих при прогностическом и аналоговом полях атмосферного давления, что приводит затем к более высоким значениям оправдываемости прогноза.

Кроме этого, анализ результатов составленных прогнозов выявил, что значения преобладающей ориентации разрывов, рассчитанные по фактическим данным, более надежны, чем полученные при дополнительных расчетах по данным дрейфа льда. Увеличение количества фактических данных путем пополнения электронного архива разрывов позволит реже прибегать к таким расчетам, что повысит оправдываемость прогнозов.

Заключение

Разработанный метод позволяет определить с заблаговременностью до 3 суток преобладающую ориентацию разрывов в ледяном покрове моря Лаптевых с пространственной дискретностью 100 км. Эта прогностическая информация имеет важное прикладное значение, так как дает возможность судоводителям планировать оптимальный маршрут следования судов по морю Лаптевых в зимне-весенний период.

Разработанный метод также может быть использован для диагностики преобладающей ориентации разрывов в море Лаптевых по фактическим полям атмосферного давления, если отсутствует возможность в оперативном режиме получить данные о разрывах в ледяном покрове по спутниковым снимкам.

Пополнение архивов данных атмосферного давления и дрейфа льда позволит сократить число редких синоптических ситуаций, не имеющих аналогов.

Пополнение электронного архива данных результатами обработки снимков ИСЗ постоянно продолжается, тем самым увеличивается количество потенциальных аналогов, обеспеченных фактической информацией о разрывах. Это позволит повысить оправдываемость и надежность прогнозов.

Конфликт интересов. Авторы не имеют конфликта интересов.

Финансирование. Исследования выполнены в рамках НИТР 5.1.1 Росгидромета на 2020–2024 гг. «Развитие моделей, методов и технологий мониторинга и прогнозирования состояния атмосферы, океана, морского ледяного покрова, ледников и вечной мерзлоты (криосферы), процессов взаимодействия льда с природными объектами и инженерными сооружениями для Арктики и технологий гидрометеорологического обеспечения потребителей».

Competing interests. The authors declare no conflict of interest.

Funding. The research was carried out within the framework of the scientific research and technology works 5.1.1 of Roshydromet for 2020–2024. “Development of models, methods and technologies for monitoring and forecasting the state of the atmosphere, ocean, sea ice cover, glaciers and permafrost (cryosphere), processes of interaction of ice with natural objects and engineering structures for the Arctic and technologies for hydrometeorological provision of consumers”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Фролов С.В. Влияние ориентации нарушений сплошности льда на эффективность движения судов в Арктическом бассейне в летний период. *Проблемы Арктики и Антарктики.* 2013;(3):35–45.

   Frolov S.V. Impact of orientation of ice discontinuites on the efficiency of ship traffic in the Arctic basin in summer. *Problemy Arktiki i Antarktiki = Problems of Arctic and Antarctic*. 2013;(3):35–45. (In Russ.)

2. Горбунов Ю.А., Карелин И.Д., Лосев С.М. К вопросу о причинах нарушения сплошности морского ледяного покрова в зимний период. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 1986;62:110–116.

   Gorbunov Iu.A., Karelin I.D., Losev S.M. On the causes of sea ice cover discontinuities in winter season. *Problemy Arktiki i Antarktiki = Problems of Arctic and Antarctic*. 1986; 62:110–116. (In Russ.)

3. Назиров М. *Льды и взвеси как гидротермодинамические трассеры по данным космических многозональных съемок*. Л.: Гидрометеоиздат; 1982. 161 с.

4. Волков Н.А., Гудкович З.М. Основные итоги изучения дрейфа льдов в Арктическом бассейне. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 1967;27:55–64.

Volkov N.A., Gudkovich Z.M. Main results of study of ice drift in the Arctic basin. *Problemy Arktiki i Antarktiki = Problems of Arctic and Antarctic*. 1967;27:55–64. (In Russ.)

5. Гудкович З.М., Доронин Ю.П. *Дрейф морских льдов*. СПб.: Гидрометеоиздат; 2001. 112 с.
6. Лосев С.М., Горбунов Ю.А. Диагностика и среднесрочный прогноз нарушений сплошности морского ледяного покрова. *Труды ААНИИ*. 1998;438:13–25.

   Losev S.M., Gorbunov Iu.A. Diagnostics and medium-range forecast of sea ice cover discontinuities. *Trudy Arkticheskogo i antarkticheskogo nauchno-issledovatel'skogo institute = Proc. of AARI*. 1998;438:13–25. (In Russ.)
7. Горбунов Ю.А., Дымент Л.Н., Лосев С.М., Фролов С.В. Среднесрочные прогнозы крупных нарушений сплошности льда при гидрометеорологическом обеспечении мореплавания в Арктическом бассейне. *Метеорология и гидрология.* 2008;(9):78–86.

   Gorbunov Iu.A., Dyment L.N., Losev S.M., Frolov S.V. Medium-range forecasts of large ice cover discontinuities for hydrometeorological support of navigation in the Arctic basin. *Russ. Meteorol. Hydrol*. 2008;33(9): 594–599. https://doi.org/10.3103/S1068373908090070
8. Горбунов Ю.А., Лосев С.М., Дымент Л.Н. Метод диагностики и среднесрочного прогноза разрывов в ледяном покрове Карского моря. *Труды ААНИИ*. 2001;443:94–102.

   Gorbunov Iu.A., Losev S.M., Dyment L.N. Method of diagnostics and medium-range forecast of leads in the ice cover of the Kara Sea. *Trudy Arkticheskogo i antarkticheskogo nauchno-issledovatel'skogo institute = Proc. of AARI*. 2001;443:94–102. (In Russ.)
9. Лосев С.М., Горбунов Ю.А., Дымент Л.Н. Оценка характеристик разрывов в ледяном покрове моря Лаптевых по снимкам самолетного радиолокатора бокового обзора и снимкам со спутников Земли «Метеор» и «NOAA». *Метеорология и гидрология*. 2003;(2):59–67.

   Losev S.M., Gorbunov Iu.A., Dyment L.N. Assessment of characteristics of leads in the Laptev Sea ice cover based on side-looking airborne radar images and images from "Meteor" and "NOAA" satellites. *Meteorologiia i gidrologiia = Meteorology and Hydrology*. 2003;(2):59–67. (In Russ.)
10. Дымент Л.Н., Аксенов П.В., Лосев С.М., Порубаев В.С. Влияние пространственного разрешения снимков ИСЗ на получаемые значения характеристик разрывов в ледяном покрове арктических морей. *Исследование Земли из космоса*. 2021;3:81–86. https://doi.org/10.31857/S0205961421030039

    Dyment L.N., Aksenov P.V., Losev S.M., Porubaev V.S. Influence of the spatial resolution of satellite images on the obtained values of the characteristics of leads in the ice cover of the Arctic seas. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2021;57(9):1081–1086. https://doi.org/10.1134/S0001433821090462
11. Смирнов В.Г., Бычкова И.А., Захваткина Н.Ю. Разработка методов оперативной оценки нарушений сплошности ледяного покрова с использованием спутниковой информации. *Российские полярные исследования*. 2022;(1):5–7.

    Smirnov V.G., Bychkova I.A., Zakhvatkina N.Iu. Development of methods for operational assessment of ice cover discontinuitesby means of satellite information. *Rossiyskie poliarnye issledovaniia = Russian polar Investigations.* 2022;(1):5–7. (In Russ.)
12. Hoffman J.P., Ackerman S.A., Liu Y., Key J.R. The detection and characterization of Arctic Sea ice leads with satellite imagers. *Remote Sensing*. 2019;11(5):521. https://doi.org/10.3390/rs11050521
13. Hoffman J.P., Ackerman S.A., Liu Y., Key J.R., McConnell I.L. Application of a convolutional neural network for the detection of sea ice leads. *Remote Sensing*. 2021;13(22):4571. https://doi.org/10.3390/rs13224571
14. Willmes S., Heinemann G. Pan-Arctic lead detection from MODIS thermal infrared imagery. *Annals of Glaciology*. 2015;56(69): 29–37. https://doi.org/10.3189/2015AoG69A615
15. *Low Resolution Sea Ice Drift Product of the EUMETSAT OSI SAF*. URL: https://osi-saf.eumetsat.int/products/osi-405-c. (accessed 24.10.2023).

16. Волков Н.А., Гудкович З.М., Углев В.Д. Результаты изучения неравномерности дрейфа льда в Арктическом бассейне. *Труды ААНИИ*. 1971;303:76–88.

    Volkov N.A., Gudkovich Z.M., Uglev V.D. Results of the study of non-uniform drift in the Arctic basin. T*rudy Arkticheskogo i antarkticheskogo nauchno-issledovatel'skogo institute = Proc. of AARI*. 1971;303:76–88. (In Russ.)

17. Дымент Л.Н., Ершова А.А., Порубаев В.С., Чиркова А.А. Расчет преобладающей ориентации разрывов в ледяном покрове моря Лаптевых по данным дрейфа льда. *Лед и снег*. 2023;63(3):454–468. https://doi.org/10.31857/S2076673423030031

    Dyment L.N., Ershova A.A., Porubaev V.S., Chirkova A.A. Calculation of the prevailing orientation of leads in the Laptev Sea ice cover based on ice drift data. *Led i sneg = Ice and snow.* 2023;63(3):454–468. (In Russ.). https://doi.org/10.31857/S2076673423030031

18. *Наставление по службе прогнозов*. Раздел 3. Часть III. М.: Триада ЛТД; 2011. 102 с.

19. Фролов С.В., Клячкин С.В. Учет влияния ориентации разрывов в ледяном покрове на скорость движения судна во льдах. *Труды ААНИИ*. 2001;443:103–111.

    Frolov S.V., Kliachkin S.V. Accounting for the impact of orientation of leads in sea ice cover on the speed of ship movement in ice. *Trudy Arkticheskogo i antarkticheskogo nauchno-issledovatel'skogo institute = Proc. of AARI*. 2001;443:103–111. (In Russ.)

20. *Моря российской Арктики в современных условиях*. СПб.: ААНИИ; 2021. 360 с.

ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА
GEOLOGY AND GEOPHYSICS

Оригинальная статья / Original paper
https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-1-103-116
УДК 569.61:550.81:528(268.5)

Перспективы использования беспилотных летательных аппаратов при поисках мамонтовых бивней в Арктике

А.Н. Смирнов, К.К. Калиновский, Н.В. Глинская✉, И.С. Дергачёва, М.А. Калиновская, В.В. Петров

Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана имени академика И.С. Грамберга, Санкт-Петербург, Россия

✉n.glinskaya@vniio.ru

Аннотация. В работе оценена возможность применения беспилотного летательного аппарата (БПЛА) при поисках экспонированных мамонтовых бивней в труднодоступных районах Арктики. Приведены результаты опытно-методических исследований, позволившие определить интервал оптимальных высот, а также возможную ширину полосы наблюдений при поисках экспонированных бивней с использованием фото- и видеосъемки с БПЛА при осуществлении поисков. Применение БПЛА обеспечивает возможность оперативного визуального контроля значительных по площади костеносных участков, фиксацию и координатную привязку обнаруженных мамонтовых бивней для последующего целенаправленного и оперативного их сбора.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, геоботанические зоны, кость мамонтовая, криолитозона, мамонтовые бивни, Североякутская костеносная провинция, Якутия

Для цитирования: Смирнов А.Н., Калиновский К.К., Глинская Н.В., Дергачёва И.С., Калиновская М.А., Петров В.В. Перспективы использования беспилотных летательных аппаратов при поисках мамонтовых бивней в Арктике. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2024;70(1):103–116. https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-1-103-116

Поступила 06.12.2023 **После переработки 16.02.2024** **Принята 27.02.2024**

Prospects of using unmanned aerial vehicles for detecting fossil mammoth ivory fields in the Arctic

Aleksandr N. Smirnov, Konstantin K. Kalinovskii, Nadezhda V. Glinskaya✉, Irina S. Dergacheva, Mariia A. Kalinovskaia, Vadim V. Petrov

Academician I. S. GRAMBERG All-Russia Scientific Research Institute for Geology and Mineral Resources of the Ocean, St. Petersburg, Russia

✉n.glinskaya@vniio.ru

Abstract. In recent decades, fossil ivory, the tusks of the Siberian mammoth of the late type (*Mammuthus primigenius* Blumenbach, 1799), has been in great demand on the world market of gemstone raw materials. Fossil ivory is a valuable highly liquid natural raw material of biogenic origin. With its decorative and technological characteristics, it is a fossil analogue of the tusks of the present-day African and Asian elephant (the populations of which are protected by UNESCO), used for the production of carved articles of great aesthetic value. Industrial clusters of mammoth tusks are concentrated in just a few Arctic regions of Russia: the only region today which holds confirmed industrial potential of fossil mammoth ivory (actually recoverable resources) is Northern Yakutia. This is due to the limited number of territories whose paleogeographic and landscape-ecological conditions were favorable for mammoths in the Late Pleistocene, as well as to the taphonomic conditions conducive to the long-term preservation of bone remains in permafrost conditions. Placer accumulations of mammoth tusks are formed as a result of denudation of cryogenic bone reservoirs containing up to 90% ice; the main destructive factors are various types of thermal erosion, which contributes to the formation of new accumulations. Today, just as centuries ago, the search for fossil ivory, is carried out mainly by walking over large areas in remote areas of the Russian Arctic. The search objects are fully or partially exposed fossil ivory lying on the surface (in the surface layer) of present-day sedimentary formations in various landscape-geomorphological and geobotanical settings. The current period of studying and exploiting the natural resources in Russia is characterized by the active use of unmanned aerial vehicles (UAVs) with video cameras, which significantly reduces the complexity of research in various fields of their application. We have carried out experimental and methodological work for the visual recognition of exposed mammoth tusks in the natural lansetting using a copter-type UAV equipped with video cameras and appropriate computer software. The interval of optimal heights is determined, as well as the possible width of the observation band during the search. The use of UAVs is expected to significantly increase the effectiveness of search through operational visual control of large areas of bone-bearing territories, fixation and coordinate binding of detected mammoth tusks for subsequent targeted and operational collection.

Keywords: cryolithozone, geobotanical zones, exposed mammoth tusks, fossil ivory, North Yakutsk bone-bearing province, unmanned aerial vehicle (UAV), Yakutia

For citation: Smirnov A.N., Kalinovskii K.K., Glinskaya N.V., Dergacheva I.S., Kalinovskaia M.A., Petrov V.V. Prospects of using unmanned aerial vehicles for detecting fossil mammoth ivory fields in the Arctic. *Arctic and Antarctic Research*. 2024;70(1):103–116. (In Russ.). https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-1-103-116

Received 06.12.2023 **Revised 16.02.2024** **Accepted 27.02.2024**

Введение

Широкое практическое использование методов дистанционных наблюдений в сфере природопользования — аэрофотосъемки — имеет уже относительно продолжительную историю, с середины XX в. Уже тогда основной областью гражданского применения аэрофотометодов являлось картирование территорий для решения задач во многих отраслях народного хозяйства — картография и геология, ландшафтоведение и гидрология, лесоустроительство, сельское хозяйство и др. Эффективность определялась полетными характеристиками летательных аппаратов, применяемой фото- и киноаппаратурой, навигационными возможностями, погодными условиями [1].

При дистанционном изучении природных объектов в арктических областях характерными задачами можно считать оценку численности животных (олени, белые медведи, ластоногие — моржи, нерпы, тюлени), проводимую на значительных площадях (десятки и сотни кв. километров), но без точной координатной привязки единицы наблюдения [1].

Современный этап (с начала 2000-х гг.) изучения и освоения природных богатств России характеризуется активным использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с видео- и фотоаппаратурой, что позволяет существенно сократить трудоемкость исследований в различных сферах их применения [2]. Расширение

сферы применения БПЛА возможно и в области освоения минерально-сырьевых ресурсов, в частности при поисках и добыче мамонтовых бивней — уникального природного сырья биогенного происхождения. В наши дни, как и столетия назад, поиски осуществляются преимущественно методом пешего исхаживания значительных по площади территорий в труднодоступных районах Российской Арктики. Одним из перспективных методов поиска может стать применение дистанционной видео- и фотосъемки с использованием беспилотных летательных аппаратов квадрокоптерного типа, способных, при необходимости, к зависанию над исследуемыми участками.

Данная работа нацелена на получение практических результатов визуального дистанционного распознавания и контроля локализации экспонированных мамонтовых бивней в условиях природного ландшафта. Объекты наблюдения фиксировались камерой видео- и фотосъемки, встроенной в беспилотный летательный аппарат коптерного типа, позволяющий менять интервалы высоты наблюдения.

Геологические и ресурсные предпосылки

Ископаемая мамонтовая кость (ИМК) — бивни сибирского мамонта позднего типа (*Mammuthus primigenius* Blumenbach, 1799), ценное высоколиквидное природное сырье биогенного происхождения, аналог современной слоновой кости, добывается на территории Российской Арктики на протяжении многих столетий. На современном историческом этапе систематическая добыча мамонтовых бивней осуществляется начиная с периода проведения геологоразведочных работ на ископаемую мамонтовую кость в 1979–1991 гг. СПО «Северкварцсамоцветы» на территории Северной Якутии.

Практическое значение имеет преимущественно экспонированная мамонтовая кость: в первую очередь ее природные скопления — россыпи и даже единичные бивни, учитывая высокую стоимость сырья. Скопления мамонтовых бивней представляют собой экзогенные образования россыпного класса, классифицируемые как россыпи валунного типа, что следует из значительных размеров моноблоков. Подобные россыпи характерны именно для камнесамоцветов (россыпи нефрита, агатов, янтаря и др.), когда ценность сырья определяется в том числе и размерами выделений полезного ископаемого [3].

Сырьевой потенциал ИМК сосредоточен лишь в немногих арктических областях России. Это объясняется ограниченностью территорий с благоприятными палеогеографическими и ландшафтно-экологическими условиями обитания *Mammuthus primigenius* в позднем плейстоцене, а также специфическими тафономическими обстановками криолитозоны, способствовавшими массовому захоронению и длительной консервации костных остатков в условиях многолетней мерзлоты [4].

Единственным на сегодня регионом, обладающим доказанным промышленным потенциалом ИМК (реально извлекаемыми ресурсами), является Северная Якутия, в пределах которой выделяется *Североякутская костеносная провинция*. Провинция выделяется по комплексу геологических, горно-геологических и геолого-промышленных показателей, характеризующих ее сырьевую специализацию, геологическую целостность и обособленность, ресурсную значимость. Высокий таксономический ранг отражает региональный масштаб развития источников питания — основы формирования россыпей ИМК. В Российской Арктике выделяются еще два крупных костеносных региона, соответствующих рангу провинции, но обладающих существенно более слабыми промышленными перспективами. Это север

Западной Сибири (п-ов Ямал, обрамление Обской губы, Гыданский п-ов) — условно *Западносибирская костеносная провинция* — и Северо-Сибирская низменность и Центральный Таймыр (от р. Енисей до Хатангского залива и далее на восток — от р. Оленёк и устья р. Лены) — условно *Северосибирская костеносная провинция*. В их пределах нередко отмечаются разрозненные находки мамонтовых бивней, но значимые россыпные скопления ИМК (месторождения) пока неизвестны. Следует отметить, что специализированные поисковые работы на ИМК в этих регионах никогда не проводились [3].

В Североякутской провинции проведенные исследования позволили оценить ресурсный потенциал ИМК для суши в 184 тысячи тонн на основе ее ландшафтного и геолого-минерагенического районирования. Расчет базируется на данных площадной продуктивности выявленных месторождений литоральной зоны [5]. Полученные результаты согласуются с данными других авторов (порядка 140 тысяч тонн) [6–8]. Результаты оценки говорят об огромном ресурсном потенциале региона, способном обеспечить устойчивый промысел на протяжении многих и многих десятилетий.

Имеющиеся официальные сведения по запасам категории C_2 и прогнозным ресурсам категорий P_1 и P_2 мамонтовой кости в Северной Якутии, принятым на баланс Центральной комиссией по запасам Министерства геологии СССР по состоянию на 1991 г. в размере порядка 190 тонн (результаты геологоразведочных работ СПО «Северквацсамоцветы»), явно занижены и не отражают реальный ресурсный потенциал провинции, который оценивается в сотни тысяч тонн [5].

Поисково-оценочная стадия геологоразведочных работ очень быстро, практически одновременно, перешла в стадию освоения: выявленные и оцененные на этом этапе месторождения были отработаны в результате т. н. «попутной добычи». Затем последовал постоянный поисковый мониторинг костеносных территорий, осуществляемый недропользователями на законных и иных основаниях уже более 30 лет: при массовой старательской добыче извлечено (собрано) более 700–800 тонн бивней, что уже сейчас значительно перекрывает балансовые показатели [5].

При широком опоисковании костеносных территорий на протяжении столетий и с учетом горно-геологических особенностей локализации мамонтовых бивней (практически полная экспонированность) трудно ожидать открытия новых продуктивных участков. Важнейшим условием длительной и стабильной эксплуатации костеносных районов Североякутской провинции является регенерация — экспонирование мамонтовых бивней и образование (восстановление) их скоплений на ранее обследованных (в том числе отработанных) участках. В различной степени регенерация свойственна всем выделенным типам россыпей, но наиболее масштабно она проявлена именно в прибрежно-морских обстановках (пляжевые россыпи), где ежегодно перерабатываются огромные объемы пород продуктивной толщи.

Поисковая объектология

Объектами поиска и добычи являются полностью или частично экспонированные мамонтовые бивни, залегающие на поверхности (в поверхностном слое) современных осадочных образований в различных ландшафтно-геоморфологических и геоботанических обстановках. Источниками являются реликтовые поля покровных лессово-ледовых образований позднеплейстоценового возраста, в изобилии содержащих костные останки фауны «мамонтового комплекса» (промышленный тип первичного коллектора), а также более молодые образования, включающие переот-

ложенную мамонтовую кость. В совокупности они образуют россыпеобразующую формацию — основу формирования россыпных месторождений мамонтовой кости [2].

Большинство обнажений приурочены преимущественно к естественным эрозионным врезам: береговым обрывам морских и озерных побережий и долинам водотоков разных порядков, где в активных литолого-динамических обстановках происходило высвобождение мамонтовых бивней. Природные россыпные концентрации ИМК сформировались в результате денудации костеносных коллекторов — первичного и производных генераций. Поскольку основная продуктивная толща представлена весьма льдистыми образованиями («едома» арктического типа содержит до 85–93 % жильного и порового льда), главными разрушающими факторами являются различные виды термоэрозии (термоабразия, термопланация, термокарст), проявленной обычно в сочетании с другими видами эрозии [9].

Такой подход позволяет выделить две группы россыпей — прибрежно-морские и континентальные, принципиально отличные по характеристикам и промышленной значимости [4]. Представленная ниже систематика россыпей ИМК, базирующаяся на анализе геолого-геоморфологических и морфодинамических об-

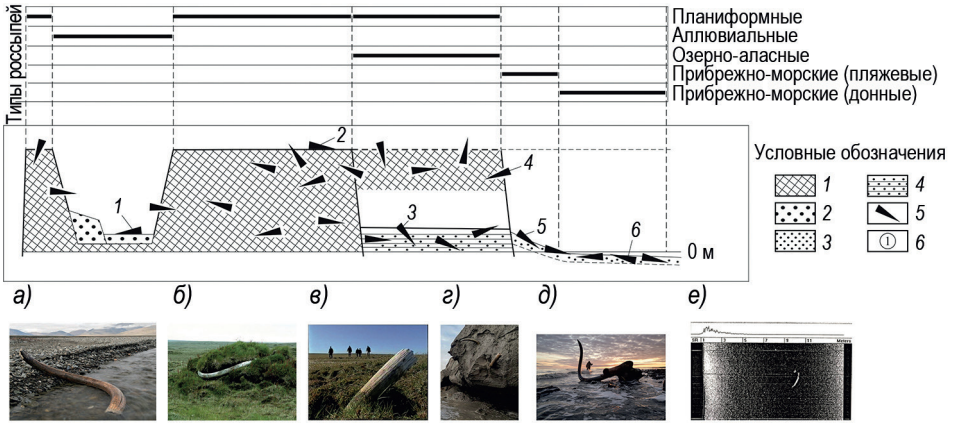

Рис. 1. Принципиальная схема локализации мамонтовых бивней в различных ландшафтно-геоморфологических обстановках.

1–4 — типы вмещающих отложений: *1* — верхнеплейстоценовые криогенно-эоловые образования едомной свиты (первичный костеносный коллектор); *2* — современные аллювиальные отложения; *3* — современные прибрежно-морские отложения (пляжевые и донные); *4* — голоценовые озерно-болотные отложения аласных котловин (вторичный костеносный коллектор); *5* — мамонтовые бивни и их фрагменты; *6* — характер залегания экспонированных мамонтовых бивней: *а* — пойменный аллювий; *б* — поверхность криогенно-эоловых образований; *в* — поверхность озерно-аласной котловины; *г* — многолетнемерзлые образования в береговом обрыве (первичный коллектор); *д* — пляж, береговая осушка; *е* — изображение бивня на сонограмме ГБО донных отложений

Fig. 1. General scheme of mammoth tusk localization for various landscape and geomorphological conditions.

1–4 — types of enclosing sediments: *1* — Upper Pleistocene cryogenic-Aeolian formations of the Edom formation (primary bone' collector); *2* — modern alluvial deposits; *3* — modern coastal-marine sediments (beach and bottom); *4* — Holocene lake-marsh deposits of the Alas basins (secondary bone collector); *5* — mammoth tusks and their fragments; *6* — the nature of the occurrence of exposed mammoth tusks: *a* — floodplain alluvium ; *б* — the surface of cryogenic-Aeolian formations; *в* — the surface of the lake basin; *г* — permafrost formations in the coastal cliff (primary collector); *д* — beach, coastal drainage; *е* — image of the tusk on the sonogram of the side-view sonar

становок их формирования и локализации, ориентирована на объекты, доступные прямому визуальному выявлению. Все выделенные типы россыпей поверхностные (приповерхностные), по возрасту — современные, образование их происходит в настоящее время (рис. 1).

В группе прибрежно-морских россыпей, ведущей по промышленной значимости, выделяются линейные пляжевые россыпи, локализующиеся на поверхности (в поверхностном слое) современного пляжа и морской террасы. Скопления мамонтовых бивней формируются в процессе абразии и термоабразии продуктивных образований, слагающих береговые уступы [4].

В группе россыпей континентального генезиса могут быть выделены два морфогенетических типа: линейные аллювиальные и планиформные криогенные. Линейные аллювиальные россыпи формируются в речных долинах различного порядка, дренирующих поля развития комплекса продуктивных отложений.

Планиформные криогенные россыпи, залегающие на поверхности лессово-ледовой равнины, образуются при экспонировании мамонтовых бивней в процессе т. н. «мерзлотного выдавливания» — явления, достаточно давно и хорошо изученного в связи с дорожным и гражданским строительством, горнодобывающими работами в районах развития вечной мерзлоты. Практически они фиксируются только в зоне арктических тундр, что определяется характером тундрового почвообразования и растительного покрова [4].

Геоботаническая зональность

Применение дистанционных методов при поисках мамонтовых бивней помогает решать различные задачи. Дешифрирование космо-аэрофотоснимков, снимков спектрозональной космосъемки (LANSAT) позволяет выявлять и дифференцировать поля распространения продуктивных коллекторов различных генераций, в том числе в относительно новых для освоения районах — например, на зачехленных территориях в южной части Североякутской костеносной провинции. Особенности залегания экспонированных бивней и характер их «камуфляжа» во многом определяются хорошо выраженной широтной геоботанической зональностью [10].

К примеру, на территории Северной Якутии, в пределах которой выделена костеносная провинция и масштабно проводятся поисковые и добычные работы, достаточно четко выделяются геоботанические зоны: зона тундр (арктических, мохово-лишайниковых и кочкарных), включая лесотундру, зона лесов и горной тундры (рис. 2). В соответствии с особенностями морфологии рельефа и развития растительного покрова зоны характеризуются принципиально различными потенциальными возможностями аэровизуального контроля поверхности (рис. 3).

Следует отметить, что в регионе выделяется также зона арктических пустынь, охватывающая о-ва Де Лонга на северо-восточном фланге архипелага Новосибирские острова, отличающаяся весьма суровыми климатическими условиями и бедностью видового состава. При этом растительность не образует сомкнутого покрова: условия применения метода аэровизуального наблюдения оптимальны, но отсутствие первичных костеносных коллекторов определяет бесперспективность территории в плане промышленно значимой костеносности.

Зона тундр, развитая в пределах озерно-аллювиальных низменностей и характеризующаяся широким распространением мерзлотных и термоэрозионных форм, приуроченная к области широкого распространения первичных и вторич-

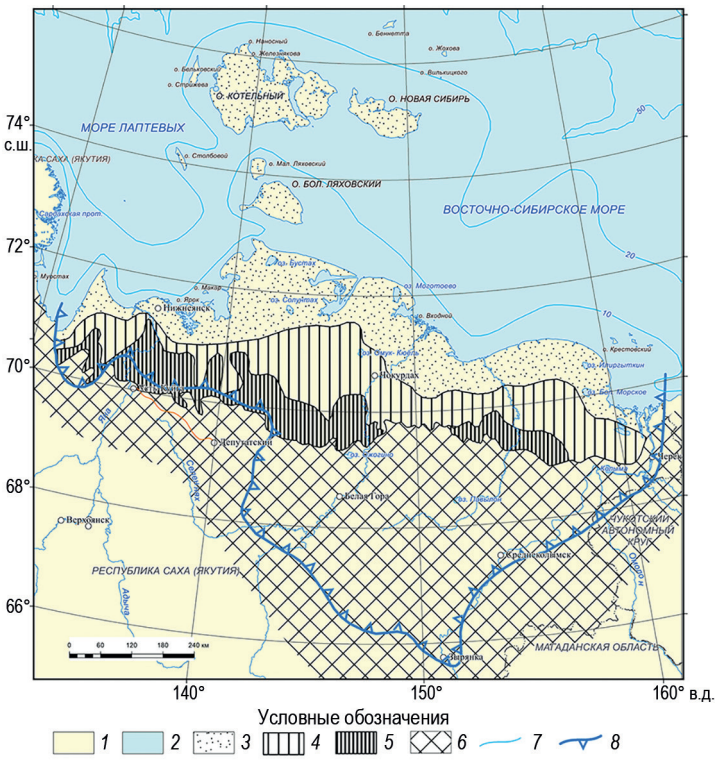

Рис. 2. Ландшафтно-геоботанические разности Северояку тской костеносной провинции.

1 — суша; *2* — морская акватория; *3* — арктические тундры; *4* — мохово-лишайниковые и кочкарные тундры; *5* — лесотундра; *6* — зона лесов и горной тундры; *7* — изобаты; *8* — граница Северояку тской костеносной провинции

Fig. 2. Landscape and geobotanical differences of the North Yakut bone province.

1 — land; *2* — marine area; *3* — Arctic tundras; *4* — moss-lichen and kochkar tundras; *5* — forest tundra; *6* — zone of forests and mountain tundra; *7* — isobates; *8* — border of the North Yakut bone province

ных костеносных коллекторов, наиболее перспективна для поисков экспонированных мамонтовых бивней аэровизуальными методами. В целом для тундровой зоны с почвенным покровом, развивающимся в условиях максимально близкого залегания к поверхности многолетней мерзлоты (глубина сезонного активного деятельного слоя до 20–40 см на севере и до 1 м на юге), характерно преобладание мохово-лишайникового покрова с кустарничками, кустарниками и травами. В зависимости от развития растительных форм зона подразделяется на четыре подзоны: арктическую, типичную (мохово-лишайниковую), кустарниковую и лесотундру, существенно различающиеся составом и плотностью растительного покрова, что и обуславливает различную эффективность аэровизуального наблюдения [1].

При районировании следует особо выделить подзону лесотундры, прослеживающуюся в южной части тундровой зоны прерывистой полосой шириной до 100 км. Лесотундра характеризуется сочетанием тундровых и лесных флористических форм: в северной части преобладают тундровые растительные группировки с кустарнико-

Рис. 3. Типовые ландшафты, характерные для участков опоискования: *а* — арктическая тундра; *б* — термоэрозионная терраса (береговой склон); *в* — речная долина в арктической тундре; *г* — пляж с осушкой; *д* — термоэрозионная терраса; *е* — лесотундра с сетью водотоков

Fig.3. Typical landscapes of the research areas: *а* — Arctic tundra; *б* — thermal erosion terrace (coastal slope); *в* — river valley in the Arctic tundra; *г* — beach with drainage; *д* — thermal erosion terrace; *е* — forest tundra with a network of waterways

выми зарослями, в южной части наблюдается постепенный переход в редкостойные северотаежные леса, занимающие до 40–50 % территории лесотундры. В связи с высокой плотностью растительного покрова данная подзона, как и расположенная южнее зона лесов, весьма неблагоприятна для аэровизуального контроля поверхности почвы и, соответственно, поисков мамонтовых бивней. Исключение составляют долины крупных рек с хорошо развитыми (и просматривающимися) руслом и поймой.

Зона лесов (северо- и среднетаежных) и горной тундры занимает территорию костеносной провинции южнее 70–69° с. ш. и приурочена преимущественно к районам развития среднегорного рельефа. Зона характеризуется преимущественно лиственничными лесами, в северной части зоны сильно разреженными (редколесье), с кустарниковым подлеском, слабо развитым травостоем; на водоразделах — торфянистым слоем различной мощности. В этой зоне для поисков мамонтовых бивней аэровизуальными методами на участках с фрагментарно развитыми костеносными коллекторами могут быть перспективны широкие долины рек с развитым руслом, поймой, террасовыми комплексами, причем с учетом сезонных особенностей стока.

Экспериментальные работы и методические вопросы

Авторами проведены опытно-методические экспериментальные работы по визуальному распознаванию экспонированных фрагментов мамонтовых бивней в природном ландшафте с использованием беспилотного летательного аппарата. При проведении экспериментальных работ был использован БПЛА китайского производства — квадрокоптер DJI Mavic 2 Pro со встроенной камерой, используемой для съемки видео и фото: Hasselglad L10-20c (размер матрицы — 1″; угол обзора — 77°; фокусное расстояние — 10 мм).

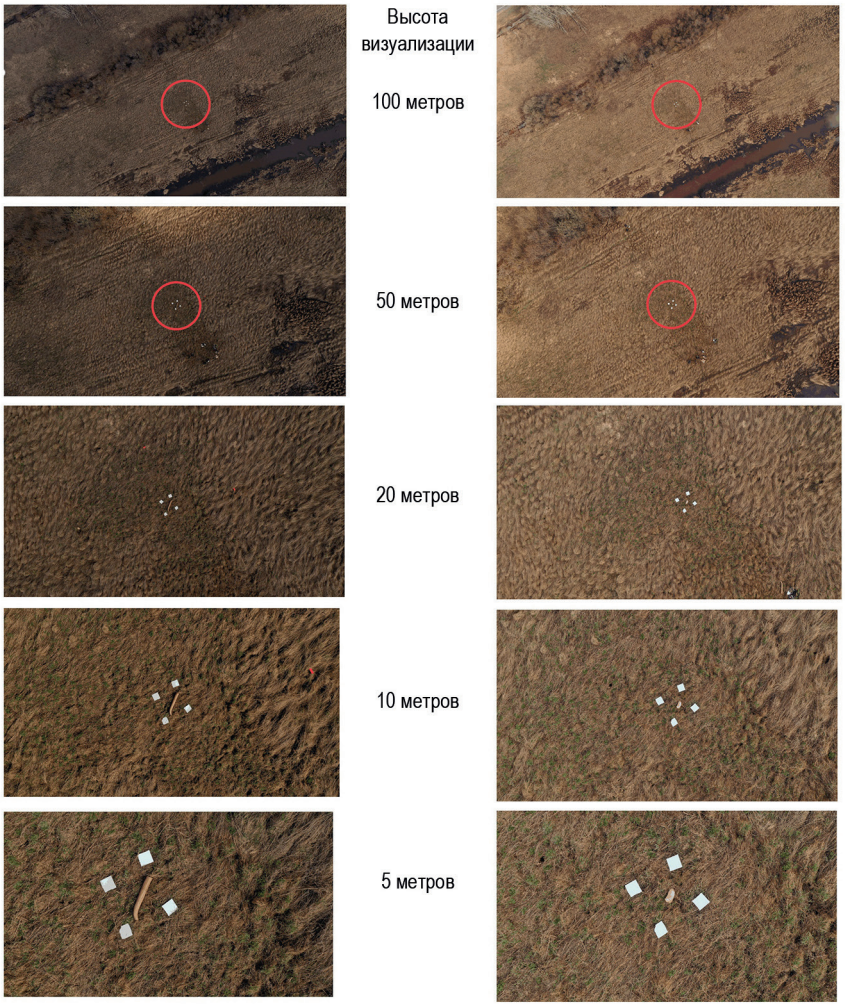

Рис. 4. Результаты дистанционного распознавания экспонированных мамонтовых бивней.

В левой колонке — полностью экспонированный бивень (длина 90 см, диаметр 12 см); в правой колонке — частично экспонированный бивень (длина 35 см, диаметр 13 см)

Fig.4. Results of remote recognition of exposed mammoth tusks.

In the left column — a fully exposed tusk (length 90 cm, diameter 12 cm); in the right column — a partially exposed tusk (length 35 cm, diameter 13 cm)

Наблюдения проведены на различных дистанциях (высотах) — от 5 до 100 м, что позволило предварительно определить интервал оптимальных высот практического применения БПЛА при проведении поисков на поверхности почвенного покрова с травяной растительностью (аналог покрова арктической тундры — см. рис. 3).

В качестве объектов наблюдений были использованы фрагменты бивней мамонта с имитацией их экспонирования в двух различных вариантах: 1 — полностью экспонированный (горизонтальное экспонирование) фрагмент бивня длиной 90 см и диаметром 12 см в средней части; 2 — частично экспонированный (торцевое экспонирование) фрагмент бивня длиной 35 см и диаметром 13 см.

Результаты визуализации, проведенной на различных дистанциях (высоты 5 — 10 — 25 — 50 — 100 м) представлены на фототаблице (рис. 4). Интервал оптимальных высот наблюдения, позволяющий предварительно идентифицировать мамонтовый бивень среднего размера, при использовании данной фотоаппаратуры

Таблица

Параметры участков визуализации при использовании фото- и киноаппаратуры на БПЛА

Table

Parameters of visualization sections with photo and video equipment used on a UAV

Высота визуализации	5 м	10 м	20 м	30 м	40 м	50 м	100 м
Ширина возможной полосы наблюдения (АВ–СД), м	6	11	23	33	41	57	95
Площадь участка (АВ×ВС), м^2	36	120	530	1090	1680	3250	9025

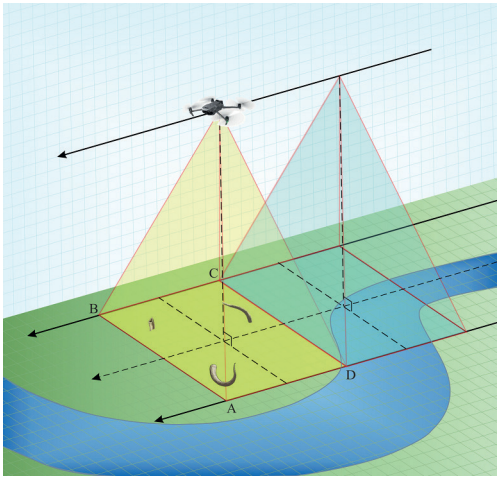

Рис. 5. Принципиальная схема визуализации экспонированных мамонтовых бивней при использовании БПЛА с фото- и видеоаппаратурой

Fig. 5. General scheme of exposed mammoth tusks visualization using UAV photo and telemetry

следует оценить в 10–40 м. Высота также пропорционально соотносится с шириной полосы наблюдения («коридора»), обеспечивающей значительный охват площади опоискования (рис. 5, таблица).

Осуществлена и проверена также возможность координатной привязки искомого точечного объекта, зафиксированного на экране монитора, — это один из важнейших аспектов дистанционных поисков.

Выводы

Дистанционное зондирование земной поверхности применяется в области системного периодического изучения состояния природных комплексов (аэрокосмический мониторинг) уже порядка полувека [11]. Но, в отличие от дистанционного мелкомасштабного зондирования Земли из космоса, даже с высокой разрешающей способностью аппаратуры (съемочные системы Landsat-5/7, SVOT-4/5, ASTER и другие), аэрофото- и видеосъемка с применением низколетящих БПЛА квадрокоптерного типа ориентирована на крупномасштабную съемку, позволяющую оперативно реагировать в различных поисковых ситуациях.

Необходимо отметить, что разработка методики использования БПЛА для решения указанных задач находится на ранней стадии развития. Рациональный выбор и возможность использования новых технических средств для поиска мамонтовых бивней в условиях арктических ландшафтов — типы БПЛА и технические характеристики видео- и фотоаппаратуры, соответствующее компьютерное и программное обеспечение — определяются целым комплексом факторов, начиная от организационных и финансовых возможностей поисковиков (недропользователей) и доступности аппаратуры, пригодной для выполнения указанной задачи в полевых условиях Арктики, и до уровня подготовленности оператора. Необходимые характеристики, принципиально влияющие на возможность эффективного опоискования костеносных территорий, включают следующие показатели: дифференцированная скорость и высота полета, возможность «зависания», визуальный контроль на мониторе и фиксация объекта с координатной привязкой, траектория движения, учитывающая возможность обнаружения и облета препятствий.

Важным моментом, влияющим на качество видеонаблюдения, является возможность стабилизации видеокамеры (что определяется количеством осей стабилизации). У недорогих БПЛА это не самая сильная сторона: чаще всего стабилизации просто нет, и для получения картинки без тремора может быть использована технология электронной стабилизации изображения.

Возможности БПЛА различных моделей расширяют и такие функции, как фиксация и прокладывание полетного курса, для чего используется встроенный GPS-приемник. В зависимости от сложности и цены модели подобные системы также различаются точностью позиционирования и другими возможностями.

Правила использования дронов определены Законом о БПЛА, разработанным на базе ФЗ-60 и вступившим в силу в июле 2017 года. Согласно этому документу, все БПЛА поделены на две категории: весом до и более 0,25 кг, при этом использование первых не требует специальной регистрации. Следует отметить, что, согласно закону, категорически запрещено использовать квадрокоптеры в зонах стратегических и военных объектов, а также на территориях заповедников. Не рекомендуется поднимать беспилотник на высоту более 50 м, чтобы не было столкновения с другими воздуш-

ными судами. В общем, на данный момент ситуация вокруг видеосъемки с использованием БПЛА в России обставлена большим набором бюрократических процедур.

Геологоразведочные работы, проведенные на территории Северной Якутии в 1980-х гг., показали высокую эффективность начального этапа: до 85 % всех обнаруженных мамонтовых бивней и их фрагментов на наиболее продуктивных — пляжевых — объектах были зафиксированы в экспонированном состоянии; аналогичная ситуация наблюдалась и на объектах других морфогенетических типов. Именно естественно высвободившиеся из коллекторов экспонированные бивни определяют «реально извлекаемые» ресурсы, тем более что искусственное разрушение многолетнемерзлых костеносных коллекторов категорически запрещено законодательными актами Республики Саха (Якутия).

Выполненные авторами опытно-методические работы по визуальному распознаванию экспонированных мамонтовых бивней в природном ландшафте показали практическую возможность использования БПЛА коптерного типа с видео- и фотоаппаратурой и соответствующим компьютерным обеспечением для дистанционной визуализации экспонированных мамонтовых бивней. Опытно-методические работы проводились в условиях характерного природного ландшафта (плотный травяной покров), аналогичного распространенному в костеносных районах Северной Якутии; в качестве объектов визуализации были использованы крупные фрагменты мамонтовых бивней различной степени экспонированности. Результаты работ позволили в первом приближении определить интервал оптимальных высот, а также ширину полосы наблюдений при поисках.

Необходимо отметить, что незначительный на сегодня опыт применения БПЛА позволяет лишь наметить методические особенности (и трудности) поисков, в том числе связанные с характеристиками и особенностями применяемых аппаратурных средств.

К достоинствам метода можно отнести:

– значительный охват территории опоискования, многократно превышающий площади при традиционных методах поисков при пешем исхаживании; возможность опоискования не только территорий, но и мелководных озерных и речных акваторий — при достаточной прозрачности воды, которая значительно выше, нежели у морской на прилегающих участках шельфа, где мамонтовые бивни могут фиксироваться методом гидролокации [12];

– возможность опоискования многометровых обрывов: на береговых участках такие обрывы достигают высоты в 20–25 м при сложной морфологии поверхности, что обусловлено термоэрозионными процессами высокольдистой костеносной толщи;

– возможность обнаружения и предварительного распознавания (визуализации) объектов поиска с координатной привязкой, что может обеспечить их оперативный сбор; это существенно важно, поскольку бивни мамонта в экспонированном состоянии (выведенные на поверхность в результате термоэрозионных процессов) не могут продолжительное время сохранять качественные характеристики, что снижает сортность и многократно — стоимость сырья.

К ожидаемым сложностям применения метода могут быть отнесены:

– необходимость специальной подготовки и последующей стажировки оператора для управления БПЛА в полевых условиях;

– допущение визуальных ошибок в идентификации отдельных находок, особенно на участках современного пляжа, где нередко встречается плавник, морфологически идентичный мамонтовым бивням;

– доступность технических средств с характеристиками, позволяющими обеспечить необходимую дальность и длительность полетов, что напрямую связано с источниками питания аппаратурных комплексов БПЛА;

– сезонность работы в условиях Арктики и погодные условия (заморозки, туманы и др.), существенно влияющие на возможность визуальной оценки поверхности; относительно краткий период отсутствия снегового покрова.

БПЛА с видео- и фотоаппаратурой могут существенно дополнить комплекс современных технических средств, намечаемых к использованию при поисках мамонтовой кости в принципиально различных ландшафтно-геоморфологических и горно-геологических условиях [13]. Их применение позволит повысить эффективность поисков путем оперативного визуального контроля значительных по площади участков костеносных территорий, фиксации и координатной привязки обнаруженных мамонтовых бивней для последующего целенаправленного и оперативного их сбора.

Использование БПЛА с фото- и видеофиксацией и визуализацией участков объекта поиска на территории России никем ранее не применялось. Данный метод предложен авторами впервые.

Конфликт интересов. Конфликт интересов отсутствует.

Финансирование. Данная работа осуществлена при выполнении государственного задания ФГБУ «ВНИИОкеангеология» по оценке минерально-сырьевого потенциала шельфовых областей Российской Федерации.

Благодарности. Коллектив авторов выражает благодарность канд. геол.-минерал. наук Николаю Дмитриевичу Кириллину и канд. биол. наук Алексею Николаевичу Тихонову за оказанную информационную поддержку.

Competing interests. There is no conflict of interest.

Funding. This work was carried out within the state assignment of the Federal State Budgetary Institution “Academician I.S. Gramberg All-Russia Scientific Research Institute for Geology and Mineral Resources of the Ocean” (FSBI “VNIIOkeangeologia”) to assess the mineral resource potential of the offshore regions of the Russian Federation.

Acknowledgments. The authors express gratitude to Nikolai Dmitrievich Kirillin, PhD of Geological Sciences, and Alexey Nikolaevich Tikhonov, PhD of Biological Sciences, for the information support provided.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Аэрометоды изучения природных ресурсов*. Под ред. Д.М. Кудрицкого и Г.Г. Самойловича. М.: Государственное издательство географической литературы; 1962. 340 с.
2. Кузнецова Н. Беспилотник эффективнее геологов. *Инвест-Форсайт: Деловой журнал.* 2018. https://www.if24.ru/tech/ (размещено 05.07.2018).
3. Смирнов А.Н. Ископаемая мамонтовая кость. СПб., ВНИИОкеангеология: *Труды НИИГА-ВНИИОкеангеология*; 2003. Т. 201. 172 с.
4. Смирнов А.Н. Классификация природных скоплений ископаемой мамонтовой кости. *Литосфера*. 2005; 4:151–164.

   Smirnov A.N. Classification of the natural accumulation of fossil ivory. *Lithosphere*. 2005;4:151–164. (In Russ.)
5. Смирнов А.Н. Ресурсный потенциал ископаемой мамонтовой кости в Российской Арктике. *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*. 2007; 4: 21–29.

   Smirnov A.N. The fossil ivory resource potential in the Russian Arctic. *Mineral Resources of Russia / Economics & Management*. 2007;4:21–29. (In Russ.)

6. Боескоров Г.Г., Кириллин Н.Д., Лазарев П.А., Тесцов В.В. Ресурсы мамонтового бивня на севере Якутии. *Проблемы региональной экологии*. 2008;2:106–109.

   Boeskorov G.G., Kirillin N.D., Lazarev P.A., Testsov. V.V. Forecasting assessment of the mammoth tusk resources in the north of Yakutia. *Problemy regionalnogo razvitya = Problems of regional development*. 2008;2:106–109. (In Russ.)

7. Кириллин Н.Д. *Ископаемая мамонтовая кость — особый геокриогенный природный ресурс севера России: проблемы права, экономики и организация рационального пользования*. Якутск: Академия наук Республики Саха (Якутия), ООО «Компания «Дани АлмаС»; 2011. 192 с.

8. Кириллин Н.Д., Ноговицин Р.Р. Ископаемая мамонтовая кость — особый природный ресурс. *Наука и техника в Якутии*. 2010;1(18):19–23.

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

10. *Северная Якутия (физико-географическая характеристика)*. Под ред. Гаккеля Я.Я. и Короткевича Е.С. Л.: Изд-во «Морской транспорт», Труды ААНИИ. 1962. Т. 236. 280 с.

11. Вицентий А.В. Применение дистанционного зондирования Земли и космических технологий для развития арктических и субарктических территорий Российской Федерации. *Труды Кольского НЦ РАН*. 2013;5(18):40–45.

12. Смирнов А.Н., Калиновский К.К. Геологические предпосылки поисков подводных скоплений мамонтовых бивней методом гидролокации в российской Арктике. *Арктика: экология и экономика*. 2020; 2: 86–96. https://doi.org/10.25283/2223-4594-2020-2-86-96

    Smirnov A. N., Kalinovskiy K.K. Geological background to search underwater accumulations of mammoth ivory by sonar in the Russian Arctic. *Arktika: ekologiya i ekonomika = Arctic: Ecology and economy*. 2020;2:86–96. (In Russ.). https://doi.org/10.25283/2223-4594-2020-2-86-96

13. Нестерова Е.А., Николаева Н.Н., Горохов И.В. Поиск местонахождений остатков мамонтовой фауны в криолитозоне с использованием ГИС-технологий и геофизических методов. В кн.: *Материалы XXI Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов в г. Нерюнгри с мемеждународным участием, 27 февраля — 29 февраля 2020 г.: Технический институт (ф) СВФУ*. Нерюнгри; 2020. С. 149–153. https://doi.org/10.18411/ tifsvfu-2020-C1-196-43

СОЦИАЛЬНАЯ ГЕОГРАФИЯ И СОЦИАЛЬНАЯ АНТРОПОЛОГИЯ
SOCIAL GEOGRAPHY AND SOCIAL ANTHROPOLOGY

Оригинальная статья / Original paper
https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-1-117-131
УДК 911.37

Эволюция факторов ликвидации поселений Мурманской области за период 1939–2023 гг.

О.А. Балабейкина✉
Санкт-Петербургский государственный экономический университет, Санкт-Петербург, Россия
✉dept.krep@unecon.ru
ОАБ, 0000-0001-9520-8880

Аннотация. Собраны и проанализированы сведения, отражающие в хронологическом порядке процесс снятия с учета населенных пунктов Мурманской области. Выявлены основные причины ликвидации поселений в регионе с учетом его природных и климатических особенностей, а также в контексте социально-экономических условий, господствовавших в России в разные периоды. Уделяется внимание хозяйственному использованию территорий снятых с учета сел и деревень на современном этапе.

Ключевые слова: ликвидация, Мурманская область, населенный пункт, обезлюдение, сельское поселение, система расселения, упразднение

Для цитирования: Балабейкина О.А. Эволюция факторов ликвидации поселений Мурманской области за период 1939–2023 гг. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2024;70(1):117–131. https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-1-117-131

Поступила 29.10.2023 **После переработки 04.12.2023** **Принята 08.12.2023**

Evolution of the factors that led to the liquidation of settlements in the Murmansk region in 1939–2023

Olga A. Balabeykina✉
St. Petersburg State University of Economics, St. Petersburg, Russia
✉dept.krep@unecon.ru
OAB, 0000-0001-9520-8880

Abstract. Using the example of the Murmansk, the paper considers the character of the processes of settlement liquidation from 1939 to the present is considered. Various reasons for the abolition of settlements in the region in different historical periods have been identified. The first years after the formation of the Murmansk region were characterized by the process of merging of the settlements being liquidated with another one that was higher in status, and the preservation of the residential territory. Later this resulted in the exclusion of the settlements from the accounting data. The main reasons for the abolition of settlements in the Murmansk region are given, which include the withdrawal of residential territories for the construction of hydroelectric power station infrastructure, the loss of economic importance of settlement-forming enterprises due to the exhaustion or the economic inexpediency of extracting and processing of resources (forest or mineral), and the reorganization of the Armed Forces of the Russian Federation. The process of depopulation and abolition of settlements depends on socio-economic factors and reflects the trends in the economic development of the country. Systematized information is presented reflecting the factors of liquidation of settlements with details about the reasons each of the character of this process in different periods. Synthesized data reflecting the current state of the abolished settlements are presented. For the most part, these are non-residential areas with ruined residential and non-residential buildings. Liquidated ancient Pomor' settlements are widely used for the purpose of summer holidays in the country. A trend is detected for regular cultural events being held on their territory and for their inclusion in tourist and sightseeing routes.

Keywords: abolition, depopulation, liquidation, locality, Murmansk region, rural settlement, settlement system

For citation: Balabeykina O.A. Evolution of the factors that led to the liquidation of settlements in the Murmansk region in 1939–2023. *Arctic and Antarctic Research*. 2024;70(1):117–131. (In Russ.). https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-1-117-131

Received 29.10.2023 **Revised 04.12.2023** **Accepted 08.12.2023**

Введение

В рамках научного осмысления вопроса оптимизации системы административно-территориального деления актуальным является рассмотрение причин и характера протекания процессов, сопровождающих количественное сокращение единиц низового уровня — отдельных поселений, поскольку именно в них сосредоточена бытовая и хозяйственная жизнь населения.

Образование или утрата каждого из населенных пунктов влечет за собой изменения в системе расселения. В России поселение может быть ликвидировано путем объединения с другим, равным или более высоким по статусу, или упразднено с исключением из учетных данных. В последнем случае при наличии постоянного населения оно переселяется, а территория включается в состав муниципального района в качестве межселенной (если сеть поселений редкая) или нежилой приграничного поселения.

Упразднение населенных пунктов отражает две взаимодополняющие тенденции мирового развития. Первая тенденция заключается в разрастании населенных пунктов и слиянии с другим, более крупным поселением. Вторая предполагает полную ликвидацию поселков, сел и деревень в связи с обезлюдением и хозяйственной бесперспективностью. Поскольку в этом случае сокращаются площади обжитых и экономически освоенных территорий, забрасывается использование объектов жилой и нежилой инфраструктуры, обозначенное явление большей частью оценивается как негативное.

Необходимы анализ и оценка характера протекания процессов упразднения населенных пунктов на региональном уровне. Одним из субъектов РФ, где фиксируются многочисленные факты ликвидации поселений, обусловленные разными

причинами, является Мурманская область, поэтому ее территория послужила полигоном представленного исследования.

Поскольку любой населенный пункт является структурным элементом системы расселения, вне контекста ее общих характеристик невозможно изучать и процессы упразднения поселений. Рассмотрению таковых специалисты неоднократно уделяли пристальное внимание, в том числе на примерах северных территорий. При этом подчеркивалась уязвимость поселений арктической зоны и их инфраструктуры [1]. Среди отечественных исследователей, оставивших заметный след в развитии обозначенной проблематики, можно упомянуть таких, как А.В. Смирнов [2], И.А. Потапов, В.В. Фаузер, Г.Н. Фаузер, Т.С. Лыткина [3, 4] и др.

Зарубежные ученые также предметно останавливались на процессах, связанных с динамикой численности населения поселений Арктики [5, 6], но научных трудов, непосредственно посвященных упраздненным населенным пунктам, среди их разработок не встречается.

Большое значение имеют немногочисленные работы, содержание которых отражает процессы ликвидации поселений на уровне отдельных регионов РФ, но это касается ограниченного перечня субъектов административно-территориального деления страны. Например, Республики Карелия [7], Тюменской области [8], Омской области [9], Псковской области [10]. Ценную фактическую информацию, связанную с реализацией ликвидации населенных пунктов, содержат научные работы, выполненные в юридическо-правовой области знаний [11].

В целом отмечаются тенденции, отражающие пристальное внимание к изучению системы расселения регионов Севера, и на их фоне все больше обозначается интерес к упраздненным поселениям, в том числе объективированный в научные работы, характеризующиеся высокой степенью детализации информации, касающейся отдельных населенных пунктов, исключенных из учетных данных [12]. Но субъекты Российской Арктики и, в частности, Мурманская область в этом аспекте предметом исследований не выступали.

Процесс ликвидации населенных пунктов в принципе может быть обусловлен целым рядом причин и факторов. Например, явиться результатом политико-административных решений, вызвавших массовое упразднение сельских поселений, как это имело место в период хрущевской «оттепели» и позиционировалось как действия, необходимые для оптимизации аппарата управления. В частности, в декабре 1959 г. Пленумом ЦК КПСС было принято решение о реорганизации «регионального и внутрихозяйственного планирования» в пределах сельских территорий. На этом основании Академией строительства и архитектуры СССР были разработаны конкретные рекомендации. Села и деревни подразделялись на «перспективные» и «неперспективные». Последние подлежали ликвидации. Критериев перспективности было три: транспортная доступность, соответствие условиям экономического развития и людность не менее 1–1,5 тыс. чел. В результате внедрения этих рекомендаций количество сельских населенных пунктов в РСФСР за 20 лет сократилось на 177,1 тыс. (60,2 %). В 1980 г. деление сел и деревень, предложенное в 1960 г., было отменено решением Комитета по гражданскому строительству и архитектуре. Но сеть поселений уже была разрушена.

Новые правовые основы, закрепляющие ликвидацию населенных пунктов, последовали с выходом Указа Президиума ВС РСФСР от 17 августа 1982 г. «О по-

рядке решения вопросов административно-территориального устройства РСФСР». Он сохраняет актуальность в части, не противоречащей Конституции РФ, а также Федеральному закону от 18 декабря 1997 г. № 152-ФЗ «О наименованиях географических объектов».

Общие принципы процедуры упразднения поселений РФ закреплены положениями Федерального закона № 131-ФЗ от 06.10.2003 (ред. от 14.07.2022), а статья 13.1 названного правового документа декларирует возможность регулирования процесса на уровне законов субъекта страны. Юридические нормы связывают ликвидацию только с сельскими населенными пунктами, но на практике она может касаться и городских поселений [11]. Распространенные критерии, которым должен соответствовать населенный пункт, подвергающийся упразднению, сводятся к численности населения менее 100 человек, невысокой плотности населения, труднодоступности поселения в транспортном отношении.

Упразднение или перенос поселений и переселение их жителей бывают вызваны реализацией масштабных экономических проектов. Например, при строительстве и подготовке к введению в эксплуатацию гидроэлектростанций затоплению подвергаются сотни городских и сельских населенных пунктов [13].

Фиксируются и случаи, когда застройка населенного пункта была уничтожена в результате стихийного бедствия природного или природно-техногенного характера, а большая часть населения погибла или подверглась вынужденному переселению. При таких обстоятельствах на основании объективных причин может рассматриваться вопрос о ликвидации поселения и исключении его из учетных данных [14].

Зачастую к упразднению поселений приводит обезлюдение, вызванное миграционным оттоком населения по причинам, обусловленным экономической бесперспективностью (безработицей), многолетней бытовой неустроенностью, удаленностью от центров, обеспеченных социальной инфраструктурой.

Цель представленной статьи — выявить основные факторы, причины, особенности и характер протекания процесса ликвидации населенных пунктов в Мурманской области за период с 1939 г. по настоящее время.

Материалы и методы

Фактические сведения, отражающие перечень, датировку и причины упразднения населенных пунктов Мурманской области содержатся в соответствующих правовых документах — отдельных законах Мурманской области, которыми в каждом конкретном случае закрепляется ликвидация одного или нескольких поселков, сел и деревень. Эмпирической базой исследования также послужили нестатистические данные, размещенные в тематических интернет-сообществах, консолидирующих лиц, имеющих отношение к конкретным упраздненным населенным пунктам. Вовлекались в исследование как источники опубликованные фотодокументы и тексты воспоминаний жителей ликвидированных поселений, а также фотоотчеты туристов, совершавших маршруты по упраздненным поселениям. Основными методами послужили анализ и синтез информации, контент-анализ.

Результаты и обсуждение

Мурманская область была образована как субъект РСФСР в мае 1938 г. В хозяйственном отношении она характеризовалась высокими темпами освоения территории, возведения промышленных объектов, ростом численности населения и являлась

одной из передовых по показателям развития лесного и сельского хозяйства. Тогда же были четко обрисованы перспективы добычи рудных полезных ископаемых [15].

Правительственный курс, с заявленной целью на ускоренное освоение и последующую переработку минеральных ресурсов Мурманской области, обозначенный в предвоенный период, предполагал развитие промышленной инфраструктуры. В частности, предприятий гидроэнергетики. Развернувшееся на многие десятилетия строительство каскадов ГЭС повлекло за собой упразднение многих населенных пунктов. Причем не только в связи с изъятием селитебных территорий под площади водохранилищ. При возведении и вводе в эксплуатацию гидроэнергетических предприятий возникали населенные пункты, функциональное назначение которых было целевым и по окончании работ утрачивалось.

Процесс упразднения поселений на территории Мурманской области в рассматриваемый период открывается январем 1939 г., когда рабочий поселок Нива-3, возникший с целью обеспечения жильем и необходимой инфраструктурой занятых на возведении одноименной ГЭС, был включен в черту Кандалакши, находившейся в 2,5 км от него. В 1950-е гг. к территории этого города в связи с разрастанием был присоединен расположенный рядом поселок Лесозавода № 6 Кандалакшского района.

В марте 1941 г. последовала ликвидация двух островных поселков Лесозавода № 8 и Лесозавода № 44 путем введения их в состав поселка Лесозаводский (ныне часть поселка городского типа Зеленоборский).

В середине 1940-х гг. наблюдается и процесс упразднения совсем небольших изолированно расположенных сельских оленеводческо-рыболовецких населенных пунктов, как, например, Яков-Салма на берегу озера Нотозеро. В 1964–1965 гг. его территория оказалась под Верхнетуломским водохранилищем.

Затем в 1959 г. последовала ликвидация поселка Ждановская (Ждановка) Печенгского района. Он стал частью поселка Заполярный (с 1963 г. — города). Возникший как поселение железнодорожников, занятых на закладке и строительстве железнодорожных путей сообщения по направлению Мурманск — Никель и подъездных путей горно-металлургического комбината «Печенганикель» в 1955 г., поселок Ждановская просуществовал в качестве отдельного поселения всего 4 года.

Последующие примеры связаны с полной ликвидацией поселений и прекращением их существования в качестве учтенных населенных пунктов.

В 1958 г. было упразднено возникшее в 1879 г. поселение Ара-Губа Кольского района (Мотовский залив Баренцева моря). Население его всегда было малочисленным, а мотивацию для освоения территории создавал располагавшийся здесь во второй половине 1880-х гг. китобойный завод. Перспективы развития поселения трудно обозначить по причине затрудненной транспортной доступности и суровости природных условий.

В пределах Печенгского района Мурманской области, в непосредственной близости от государственных границ с Норвегией и Финляндией, до 1962 г. находился населенный пункт Наусти. Изначально его территория относилась к Пазрецкому погосту в качестве выселка из саамского села Чалмъявр (Салмиярви). Затем, будучи в составе независимой Финляндии, поселение получило импульс к развитию благодаря строительству дороги, связывающей Рованиеми с портом Лиинахамари Печенгского залива Баренцева моря. Поселение Наутси возникло на пересечении этой трассы и р. Наутсийоки и постепенно разрасталось, пока не вмешались события, связанные с войнами и переделом принадлежности территории.

В 1944 г. населенный пункт подвергся разрушениям, так как в этом районе проходила Петсамо-Киркенесская операция, обеспечивавшая наступление войск Карельского и Северного фронтов. Упразднение бывшей финской деревни последовало в 1962 г., и на данный момент территория представляет собой нежилое урочище в Печенгском районе Мурманской области.

В последние десятилетия бывшее поселение оказалось в центре внимания специалистов — историков и археологов, поскольку с 1941 по 1944 г. здесь базировался концентрационный лагерь для советских военнопленных «Шталаг-322», известный также как концлагерь Наутси. Так как одним из перспективных и приобретающих все большую популярность направлений туристско-экспедиционной деятельности в России является мемориализация «негативного наследия» [16], этот исторический факт может привлечь профессиональный и общественный интерес к территории бывшего населенного пункта.

Оптимизация использования сельскохозяйственных территорий, заявленная Правительством СССР в 1950-х гг., коснулась и Мурманской области. В этой связи, например, в 1957 г. был исключен из учетных данных рыболовецкий населенный пункт Шельпино (Терский район), а 1962 г. — населенный пункт Захребетное Ловозерского района, входивший в рыболовецкий колхоз. Крайне затрудненное транспортное сообщение (расстояние до районного центра около 70 км возможно преодолеть только морским путем) привело к упадку и обезлюдению. Как неперспективные перестали существовать в 1962 г. и саамское село Чудзьявр Ловозерского района, а также Семиостровье, Рында.

В 1966 г. была упразднена деревня Порья Губа Терского района, животноводческое хозяйство которой пришло в упадок, а ее население в составе чуть более 20 человек было переселено в Белокаменку [17].

Начало 1960-х гг. в Мурманской области ознаменовано строительством и введением в промышленную эксплуатацию крупных гидроэнергетических сооружений. Самой мощной ГЭС на Северо-Западе РФ по-прежнему является Верхнетуломская. Образованное при ней одноименное водохранилище площадью 74 500 га и объемом 11,5 км^3 было заполнено в 1964–1965 гг. Затоплению подверглись территории села Рискикент, известного с XVI в. как саамский погост, а также основанных уже в советское время и недолго просуществовавших населенных пунктов Зеленый Бор, Кентишь, Командировка, поселок Рипа-Салма и др. Под Иовским водохранилищем оказался населенный пункт Тумча. К моменту затопления многие из населенных пунктов были уже фактически ликвидированы во время войны (Рискикент), а также по причине выселения финнов с приграничных территорий.

В 1966–1967-х гг. завершился начатый за десять лет до этого процесс переселения населения из деревни Чальмны-Варрэ (Ивановка) Ловозерского района. Поводом к ликвидации, закрепленной в документах в 1971 г., формально послужил так и не реализованный проект строительства ГЭС на р. Поной. Но реальной причиной в опубликованных воспоминаниях жителей бывшего населенного пункта указывается стремление местных властей избавиться от необходимости решать проблемы со снабжением, транспортировкой, обеспеченностью рабочими местами населения удаленного поселения[1]. На данный момент деревня Чальмны-Варрэ представляет

[1] Симоновская А.В. Чальмны-Варрэ: ликвидированная деревня как место памяти // Кольские карты. Электронный ресурс. Режим доступа: URL https://www.kolamap.ru/library/simonovskaja.htm?ysclid=ls2t9ksb2w855856507

собой нежилую территорию с несколькими руинированными заброшенными жилыми постройками, т. к. большая часть домов была разобрана и перевезена. Бывшая деревня и прилегающая к ней территория вызывают интерес как у этнографов, археологов, историков, так и у туристов, благодаря обнаруженным здесь в начале 1970-х гг. в результате научно-экспедиционной деятельности неолитическим памятникам.

Интересный феномен населенного пункта, «который существует в действительности, но не существует де-юре» [12], представляет собой деревня Кузрека Терского района Мурманской области, упраздненная в 1978 г. Одну часть единого селитебного пространства бывшего населенного пункта занимают садоводческие товарищества, а другая относится к территории без населения. Дачная застройка состоит домов, появившихся в последние годы и пригодных для проживания в теплый сезон. В исторической части деревни сохранились старые дома поморов. Бывшее поселение включается в экскурсионно-познавательные маршруты по Терскому берегу. Кроме того, его территория с 2010 по 2019 г. являлась площадкой для проведения ежегодного «Праздника поморской Козули», собиравшего до 1–2 тыс. участников из Мурманской области и других регионов России [12].

Под дачное заселение в летний период используется и упраздненное в 1977 г. село Поной Ловозерского района, хотя домов там гораздо меньше, чем в Кузреке, — около десятка. Формально причиной ликвидации, как и в случае с деревней Чальмны-Варрэ, послужила опасность затопления территории по причине строительства и ввода в эксплуатацию ГЭС на р. Поной, которое так и не было осуществлено. Но в перечне прочих версий переселенные жители называли личную инициативу председателя местной администрации.

В пределах Мурманской области фиксируются и случаи, когда строительство гидротехнических сооружений послужило возникновению, а затем, с утратой функциональной необходимости, упразднению поселения. Так, в 1965 г. с целью обеспечения инфраструктурой трудящихся, направленных в регион для возведения Серебрянских ГЭС, на правом берегу р. Воронья в Кольском районе был образован поселок Серебрянский. В 1978 г. поселение было ликвидировано, поскольку необходимые работы были закончены и командированные туда лица поселок покинули.

Один из примеров описанного ранее типа «пульсирующего», хотя и юридически упраздненного, населенного пункта, фактически насчитывающего не только сезонное население, но и проживающих регулярно нескольких человек, — ликвидированная в 1988 г. деревня Стрельна (Стрельно) Терского района. Ближайший населенный пункт, откуда осуществляется регулярное транспортное сообщение с Мурманском и ЗАТО Островной, находится в 12 км. Это село Чапома, куда в летний сезон несколько раз в месяц заходит пассажирский теплоход.

Несмотря на крайне затрудненную транспортную доступность, застройку Стрельны образуют не только руинированные жилые и нежилые постройки, но и несколько дачных домов, находящихся в отличном состоянии. Один из них по частной инициативе занят под экспозицию «Быт поморов», общедоступную для посещения.

В 1988 г. было исключено из учетных данных и село Юркино Кольского района. Причина — обезлюдение и упадок хозяйства рыболовецкого и оленеводческого колхоза. В настоящее время селитебная территория занята дачными товариществами. Аналогично Кузреке, Поною и Стрельне, упомянутым ранее, населенный пункт можно назвать «пульсирующим» или фактически существующим, но не учтенным

сельско-городским сообществом. В отличие же от приведенных выше примеров населенных пунктов, в данном случае импульс к развитию дает регулярное и непродолжительное по времени в пути автобусное сообщение с Мурманском.

Дальнейшее значительное количество упраздненных поселений в Мурманской области последовало в 1999 г. Закон Мурманской области от 03.11.1999 № 162–01-ЗМО причиной ликвидации 12 населенных пунктов называет отсутствие проживающего населения.

Финансовый кризис, сопровождавший период распада СССР, повлек за собой обезлюдение ж/д станции Питкуль г. Апатиты с подведомственной территорией. Ныне на месте ликвидированного поселения располагается дачный поселок с сезонным населением.

Заброшенную территорию представляет собой бывший поселок лесозаготовителей Куцколь, основанный в 1950 г., подведомственный Мончегорску, но расположенный в 60 км от него. Социально-экономические причины, прежде всего безработица, повлекли за собой миграцию населения в 1990-х гг., и к моменту ликвидации в 1999 г. поселение обезлюдело. Бывшим заготовительным пунктом служил и поселок Уполокша Ковдорского района, упраздненный в этот же период и, благодаря развитому регулярному железнодорожному сообщению, используемый под дачную застройку с сезонным проживанием.

Упразднению подверглись Колмозеро, созданный как поселок при метеостанции в конце 1950-х гг., а также островное поселение Сосновец, где теперь нет постоянного зарегистрированного населения, но ведутся метеонаблюдения и обслуживается маяк.

Первые постсоветские годы были ознаменованы реорганизацией Вооруженных сил РФ, в рамках которой в 1996 г. последовало расформирование одной из воинских частей, базировавшихся в пределах поселения Мыс Скорбеевский Печенгского района, а спустя три года — упразднение самого поселения.

По этой же причине был упразднен населенный пункт Сетьнаволок, входивший в состав ЗАТО Полярный (с 2008 г. — Александровск). Ликвидации подверглись и подведомственные ему островные поселения, функция которых — обслуживание навигационных ориентиров (Маяк Палагубский, Маяк Сальный, Маяк Белокаменский, Маяк Великий, Маяк Ретинский).

Законом Мурманской области № 283–01-ЗМО от 4 июля 2001 г. за отсутствием проживающего в нем населения было упразднено старинное поморское поселение Устье Варзуги. Его обезлюдение обусловлено крайне затрудненной транспортной доступностью и хозяйственной бесперспективностью. В бывшем поселении сохранилась руинированная жилая застройка и здание бывшей фактории. Территория привлекает внимание туристов, ориентированных на экстремальные виды отдыха.

В дальнейшем сохранились тенденция к упразднению населенных пунктов, обслуживающих навигационные капитальные сооружения, а также покинутых населением по причине передислокации базировавшихся там воинских подразделений. В рамках обозначенных направлений Законом Мурманской области № 793–01-ЗМО от 29.09.2006 были ликвидированы Маяк Большой Олений Кольского района и Маяк Седловатый ЗАТО Полярный, поселки Гранитный Кольского района и Харловка Ловозерского р-на. Через год упразднению подверглись Маяк Выевнаволок, Маяк Пикшуев, Порт-Владимир, Новая Титовка Кольского района, имевшие такое же назначение, как и вышеперечисленные населенные пункты.

Упразднение некоторых населенных пунктов в 2007 г. было продиктовано и другими причинами. С учета был снят поселок Слюда Ковдорского района, с 1990-х гг. нежилой и посещаемый исключительно сезонно. Причиной переселения населения стала экономическая нерентабельность градообразующего предприятия МУП «Ковдорслюда», продукция которого не выдержала конкуренции рыночных отношений, следствием стали безработица и обезлюдение. Территория, занятая ранее поселком Слюда, представляет собой подвергающуюся разрушениям кирпичную и деревянную застройку.

Экономической нецелесообразностью дальнейшего сохранения населенного пункта было продиктовано и переселение жителей поселка Верхний Нюд в Мончегорск. Одним из негативных последствий официального упразднения послужило снятие с баланса 16-километрового сложного участка грунтовой дороги, ведущей от поселка к Ковдорской трассе. Ликвидация населенного пункта влечет за собой прекращение финансирования с целью содержания ведущих непосредственно к нему транспортных коммуникаций. Поскольку эксплуатационное состояние не соответствует допустимому по условиям обеспечения безопасности дорожного движения, дорога, ведущая в бывший поселок Верхний Нюд, в 2015 г. была закрыта для автомобильного транспорта. Указанное обстоятельство влечет за собой утрату доступности территории бывшего поселка для пребывания там с целью ведения подсобного хозяйства или посещения кладбища.

Обсуждается вероятность возникновения перспектив для возобновления ликвидированного населенного пункта, связанная с высказываемыми предположениями о возможном наличии элементов платиновой группы в толщах метагаббро в блоке Верхний Нюд [18].

Одновременно с поселком Верхний Нюд последовала ликвидация поселения Пиренга, входившего в подведомственную территорию г. Полярные Зори, а также нескольких поселков, выстроенных вдоль железной дороги Санкт-Петербург — Мурманск и носивших типовые названия по километровой отметке: Путевая Усадьба 54 км, Путевая Усадьба 61 км, Путевая Усадьба 75 км, Путевая Усадьба 85 км, Путевая Усадьба 90 км, Путевая Усадьба 101 км Кольского района.

Спустя еще год был упразднен по причине отсутствия постоянного населения Ниванкюль, формально входивший в черту городского поселения Верхнетуломский Кольского района, но фактически крайне труднодоступный в транспортном отношении и обезлюдевший. В 2009 г. было ликвидировано островное поселение Остров Харлов (Семиостровье) Ловозерского района с закрытием метеостанции, функционировавшей на его территории.

Наконец, в 2013 г. в связи с обезлюдением на почве экономической бесперспективности последовало упразднение населенного пункта Октябрьский г. Кировска с подведомственной территорией. В бывшем поселении сохранились и подвергаются разрушению остатки жилой застройки. Тогда же, в 2013 г. был снят с учета населенный пункт Маяк Тювагубский Кольского района.

Распределение упраздненных населенных пунктов по факторам ликвидации с указанием датировки представлено в составленной автором таблице.

Результаты систематизации исходных сведений об упразднении населенных пунктов Мурманской области за рассматриваемый период свидетельствуют о взаимосвязи этого процесса с направлением и состоянием экономического развития

Таблица

Факторы ликвидации населенных пунктов Мурманской области (1939–2013 гг.)

Table

Factors of liquidation of settlements in the Murmansk region (1939–2013)

Фактор	Причина (обстоятельство)	Примеры населенных пунктов (год ликвидации)	Результат
Хозяйственное освоение ресурсов Мурманской области	Разрастание рабочего поселка, обеспечивавшего строительство ГЭС	Рабочий поселок Нива-3 (1939)	Расширение г. Кандалакша путем присоединения расположенных рядом поселений
	Разрастание рабочего поселка	Пос. Лесозавода № 6 (1950-е)	
	Разрастание и присвоение статуса рабочего поселка Лесозаводский	Пос. Лесозавода № 8, пос. Лесозавода № 44 (1941)	Расширение рабочего поселка Лесозаводский путем присоединения расположенных рядом поселений
	Разрастание пос. (города) Заполярный	Пос. Ждановская (1959)	Расширение пос. (города) Заполярный путем присоединения расположенных рядом поселений
	Строительство и введение в эксплуатацию крупных ГЭС	Нас. пункт Тумча (1961), с. Рискикент (1962), пос. Кентишь Командировка, Рипа-Салма, Сонгельск, Устье-Лутта (и еще несколько десятков населенных пунктов)	Затопление под площадь водохранилища
		Д. Чальмны-Варрэ (Ивановка) (1971), Поной (1977), пос. Серебрянский (1978)	Незаселенная местность, дачные участки. Проект ГЭС не был реализован
	Утрата функционального значения рабочего поселка, обеспечивавшего строительство ГЭС	Пос. Серебрянский (1978)	Незаселенная местность

Политика государства, связанная с экономической целесообразностью поселений	Изолированность и транспортная труднодоступность территории	Нас. пункт Яков-салма Нотозерского с. с. (середина 1940-х), Сальница (1950), нас. пункт Ара-губа (1958), Захребетное (1962), Рында (1962), Семиостровье (1962), Чудзьявр (1962), Шельпино (1962)	Незаселенная местность
		Порья Губа (1966), Кузрека (1978), Д. Стрельна (1988)	Дачные участки
		С. Юркино (1988), Устье Варзуги (2001)	Нежилая местность
Геополитическое положение	Разрушение в ходе ВОВ	Нас. пункт Наусти (фин. *Nautsi*) (1962)	Незаселенная местность, урочище
Финансовый и хозяйственный кризис постсоветского периода	Отсутствие населения, миграция. Реорганизация ВС РФ	Ж/д ст. Питкуль (1999), Куцколь (1999), Уполокша (1999), Колмозеро (1999)	Незаселенная местность, дачная застройка
		Сосновец (1999), Мыс Скорбеевский (1999), Сетьнаволок (1999), Маяк Палагубский (1999), Маяк Сальный (1999), Маяк Белокаменский (1999), Маяк Великий (1999), Маяк Ретинский, Маяк Большой (2006), Олений Маяк (2006), Седловатый (2006), пос. Гранитный (2006), с. Харловка (2006), Маяк Выевнаволок (2007), Маяк Пикшуев (2007), Порт-Владимир (2007), Новая Титовка (2007)	Обслуживание маяка
	Нерентабельность градообразующего предприятия. Отсутствие населения, изолированность, транспортная труднодоступность территории. Закрытие метеостанции	Пос. Слюда (2007), пос. Верхний Нюд (2007), пос. Пиренга (2007), Путевая Усадьба (2007), Ниванкюль (2008), Остров Харлов (2009), Октябрьский (2013), Маяк Тювагубский (2013)	Нежилая местность, посещается сезонно

страны и региона. В конце 1930-х ключевую роль сыграл государственный курс, взятый на освоение ресурсов области. Населенные пункты, обеспечивавшие введение в эксплуатацию новых промышленных объектов, разрастались и объединялись в более крупные. Одновременно с этим ликвидировались удаленно расположенные небольшие села и деревни. Коренное финское население некоторых из них переселялось директивно.

В 1950–1960-е гг. процесс строительства ГЭС в Мурманской области снова активно возобновляется, выступая фактором ликвидации десятков поселений. Причем в некоторых случаях проекты гидросооружений так и не были реализованы.

Политика ликвидации неперспективных деревень, принятая в СССР в 1960-е гг., также отразилась на селах и деревнях Мурманской области. Перспективность оценивалась по таким критериям, как транспортная удаленность и людность, а в регионе насчитывалось большое количество изолированно расположенных сел и деревень с постоянным населением в несколько или несколько десятков человек.

Финансовые и хозяйственные кризисные преобразования постсоветского периода также служили фактором обезлюдения, становясь причиной миграционного оттока из хозяйственно бесперспективных поселений. Эти процессы продолжаются.

На начало 2023 г. в Мурманской области фиксируются учтенные поселения без постоянного населения — населенные пункты Кувшинная Салма и Сайда Губа, расположенные в пределах ЗАТО Александровск. Ввиду обезлюдения они являются претендентами на ликвидацию соответственно действующей законодательной процедуре. Можно утверждать, что процессы, приводящие к упразднению поселений в Мурманской области, продолжают развиваться на общем фоне сокращения численности населения региона [19, 20].

Выводы

Обращение в исследованиях к процессу упразднения населенных пунктов на уровне регионов имеет в настоящее время большое значение, поскольку на территориях административно-территориальных субъектов РФ, среди которых и Мурманская область, фиксируются примеры, когда таковые восстанавливаются в статусе жилых и/или вовлекаются в туристско-рекреационное хозяйство в качестве объектов экскурсионного посещения или дестинаций, подходящих для длительного пребывания с целью отдыха и восстановления вдали от цивилизации.

Мурманская область выступает примером субъекта РФ, в пределах которого ликвидация населенных пунктов осуществлялась на протяжении всего периода его существования: с 1939 г. по настоящее время — и приобретала разные формы.

Во многом процесс упразднения поселений служит отражением общих тенденций развития государства и региона. Так, в конце 1930-х — начале 1940-х гг. Мурманская область занимала передовые позиции в РСФСР по темпам экономического развития. Население основанных в ее пределах новых рабочих поселков задействовалось на лесозаготовке или при строительстве промышленных объектов. По мере роста и развития территории населенные пункты упразднялись путем включения в состав расположенных рядом поселений более высокого ранга.

Но большая часть примеров ликвидации связана с исключением из учетных данных. В перечне факторов, повлиявших на этот процесс, фигурируют как отражающие общие в развитии страны тенденции (упразднение сельских поселений

в 1950-х гг. в результате директивного решения руководства государства), так и свойственные конкретной территории и продиктованные особенностями ее хозяйственного освоения.

В 1960-е гг. поселения Мурманской области упразднялись по причинам, обусловленным введением в эксплуатацию сразу нескольких ГЭС и, соответственно, затоплением селитебных площадей. Фиксируются и злоупотребления, инициированные представителями местных властей, использовавших указанное обстоятельство в личных целях как предлог для ликвидации поселения, хотя реальных оснований для этого не имелось.

Следует отметить, что расположенность территории Мурманской области в пределах арктического и субарктического климатических поясов, создающая существенные препятствия для успешного ведения хозяйственной деятельности, а также удаленность и труднодоступность береговых и островных территорий диктуют реальные предпосылки к обезлюдению и упразднению поселений (например, населенный пункт Ара-Губа Кольского района). В таком случае процесс упразднения поселения нельзя рассматривать в негативном ключе.

Весьма существенно на ликвидации поселений Мурманской области отразился социально-экономический кризис, сопровождавший распад СССР. Среди его проявлений, приведших к ликвидации отдельной группы поселений, стала передислокация Вооруженных сил РФ, подразделения которых базировались в их пределах.

В 1990-е гг. обозначилась и экономическая несостоятельность ряда градообразующих предприятий по добыче и переработке минерального сырья, вызвавшая безработицу. Соответственно, последовали решения о переселении населения в ближайшие населенные пункты и ликвидация поселений (поселки Слюда, Верхний Нюд).

В Мурманской области фиксируются тенденции к возрождению некоторых ранее упраздненных поселений, функционирование которых в качестве дачных позволяет отнести их к категории «пульсирующих» в летний сезон. Последнее касается в основном бывших древних поморских деревень с частично сохранившейся жилой застройкой. Кроме того, многие из ликвидированных ранее поселений привлекают внимание туристов. Возможности использования территорий упраздненных поселений в контексте современных тенденций открывают перспективы для дальнейших исследований в этой области.

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. No funding was provided.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Беляева Н.Б., Тучков В.А. Социальная инфраструктура арктических городов Северной Европы и Российской Федерации. *Технико-технологические проблемы сервиса*. 2022;3(61):110– 118.

   Beliaeva N.B., Tuchkov V.A. Social Infrastructure of the Arctic cities of Northern Europe and the Russian Federation. *Tekhniko-tekhnologicheskie problemy servisa = Technical and Technological Problems of Service*. 2022;3(61):110–118. (In Russ.).

2. Смирнов А.В. Население мировой Арктики: динамика численности и центры расселения. *Арктика и Север*. 2020;40:270–290. https://doi.org/10.37482/issn2221-2698.2020.40.270

Smirnov A.V. The Arctic population: dynamics and centers of the settlement system. *Arktika i Sever = Arctic and North*. 2020;40:270–290. (In Russ.). https://doi.org/10.37482/issn2221-2698.2020.40.270

3. Потапов И.А. Трансформация городского пространства Архангельска. *Географический вестник*. 2023;3(66):27–40. https://doi.org/10.17072/2079-7877-2023-3-27-40

   Potapov I.A. Transformation of the urban space of Arkhangelsk. *Geographical Bulletin*. 2023;3(66):27–40. (In Russ.). https://doi.org/10.17072/2079-7877-2023-3-27-40

4. Фаузер В.В., Смирнов А.В., Лыткина Т.С., Фаузер Г.Н. Вызовы и противоречия в развитии Севера и Арктики: демографическое измерение. *Арктика: экология и экономика*. 2022;12(1):111–122. https://doi.org/10.25283/2223–4594-2022-1-111-122

   Fauzer V.V., Smirnov A.V., Lytkina T.S., Fauzer G.N. Challenges and contradictions in the development of the North and the Arctic: demographic dimension. *Arktika: ekologiya i ekonomika = Arctic: Ecology and Economy*. 2022;12(1):111–122. (In Russ.). https://doi.org/10.25283/2223–4594-2022-1-111-122

5. Gassen N.S., Heleniak T. *The Nordic population 2040 — analysis of past and future demographic trends. Report 2019:6.* Stockholm: Nordregio; 2019. 52 p. https://doi.org/ 10.30689/R2019:6.1403-2503

6. Hamilton L.C., Wirsing J., Saito K. Demographic variation and change in the Inuit Arctic. *Environmental Research Letters*. 2018;13:11507. https://doi.org/10.1088/1748–9326/aae7ef

7. Балабейкина О.А., Коробущенко В.Ю., Мазуренко А.А. Упраздненные поселения северо-восточных районов Республики Карелия (1938–2005 гг.). *Вестник Псковского государственного университета. Серия: Естественные и физико-математические науки*. 2023;16(1):3–12.

   Balabeikina O. A., Korobushchenko V. Yu., Mazurenko A. A. Abolished settlements of the North-Eastern districts of the Republic of Karelia (1938–2005). *Vestnik Pskovskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of the Pskov State University*. 2023;16(1):3–12. (In Russ.).

8. Петров Ю.В. Процессы упразднения населенных пунктов на юге Тюменской области в период 1989–2018 годов. *Горные ведомости*. 2019;1(161):88–95.

9. Соколова Е.В. Ключевые причины исчезновения деревень Колосовского района Омской области в 1950–1980-е гг. *Вестник Омского государственного аграрного университета*. 2016;22(2):261–268.

   Sokolova E.V. Key reasons of disappearance villages Kolosovsky district Omsk region in 1950–1980-ies. *Omsk SAU Bulletin*. 2016;22(2): 261–268. (In Russ.).

10. Дементьев В.С., Клейменов С.П. Изменения в сельском расселении на территории Псковской области в начале XXI века. *Псковский регионологический журнал*. 2018;34(2):40–55.

    Dementiev V. S., Kleimenov S. P. Changes in rural settlement in the territory of the Pskov region in the beginning of the XXI century. *Pskovskiy regionologicheskiy zhurnal = Pskov Journal of Regional Studies*. 2018;34(2):40–55. (In Russ.).

11. Праскова С.В. Упразднение муниципальных образований: критерии допустимости. *Журнал российского права*. 2011;3(171):57–64.

    Praskova S.V. Abolishment of municipal bodies: criterions of admissibility. *Journal of Russian law.* 2011;3(171):57–64. (In Russ.).

12. Савоскул М.С., Алексеев А.И. Сельско-городские сообщества в официально несуществующем населенном пункте. *Вестник Московского университета. Серия 5: География*. 2019;(4):119–123.

    Savoskul M. S., AlekseevA. I. Rural-urban community in officially “non-existent” settlement. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 5: Geografiya = Lomonosov Geography Journal*. 2019;4:119–123. (In Russ.).

13. Янковская Г.А. Негативные последствия советских гидроэнергетических проектов: форматы и практики мемориализации. *Сибирские исторические исследования*. 2021;4:119–137. https://doi.org/10.17223/231246Ш34/9

    Yankovskaya G.A. Adverse effects of Soviet hydropower projects: formats and practices of memorialization. *Siberian Historical Research*. 2021;4:119–137. (In Russ.). https://doi.org/10.17223/2312461X/34/9

14. Кузьмин С.Б. Опасные природные процессы в Российской Федерации. *Проблемы анализа риска*. 2019;16(2):10–35. https://doi.org/10.32686/1812-5220-2019-16-2-10-35

    Kuzmin S.V. Natural disasters in the Russian Federation. *Issues of Risk Analysis*. 2019;16(2):10–35. (In Russ.). https://doi.org/10.32686/1812-5220-2019-16-2-10-35

15. Кустышев А.Н. Промышленное строительство НКВД СССР на Кольском Севере в конце 1930-х — начале 1940-х гг. *Экономическая история*. 2022;18(2):132–142. https://doi.org/10.15507/2409-630X.057.018.202202.132-142

    Kustyshev A.N. NKVD Industrial engineering in the Kola North in the Late 1930s — early 1940s. *Ekonomicheskaya istoriya = Russian Journal of Economic History*. 2022;18(2):132–142. (In Russ.). https://doi.org/10.15507/2409-630X.057.018.202202.132-142

16. Стаф В.С. Мемориализация «негативного наследия» в современной России на материале лагерных музеев в Пермском крае. *Вестник Томского государственного университета*. 2018;(428):183–187. DOI 10.17223/15617793/428/24

    Staf V.S. Memorialization of the “negative heritage” in modern Russia on the basis of the camp museums in Perm Krai. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta = Tomsk State University Journal*. 2018;428:183–187. (In Russ.). https://doi.org/ 10.17223/15617793/428/24

17. Циркунов И.Б. Порья Губа: опыт историко-социологических исследований. *Наука и бизнес на Мурмане*. 1998;(6):60–86.

18. Грошев Н.Ю., Припачкин П.В. К вопросу о геологической позиции и платиноносности массива Габбро-10, Мончегорский комплекс, Кольский регион. *Руды и металлы*. 2018;4:4–13. https://doi.org/10.24411/0869-5997-2018-10008

    Groshev N.Yu., Pripachkin P.V. Geological setting and platinum potential of Gabbro-10 massif, Monchegorsk complex, Kola region. *Ores and Metalls*. 2018;4: 4–13. (In Russ.). https://doi.org/10.24411/0869-5997-2018-10008

19. Шарова Е.Н., Бурцева А.В. Современная демографическая ситуация на Кольском севере: к вопросу о присутствии человека в Арктике. *Теория и практика общественного развития*. 2020;1(143):68–73. https://doi.org/10.24158/tipor.2020.1.9

    Sharova Ye.N., Burtseva A.V. The current demographic situation in the Kola North: concerning human presence in the Arctic. *Theory and practice of social development*. 2020;1(143):68–73. (In Russ.). https://doi.org/10.24158/tipor.2020.1.9

20. Heleniak T. The future of the Arctic populations. *Polar Geography*. 2020;44(2):1–17. https://doi.org/10.1080/1088937X.2019.1707316

Памяти Владимира Алексеевича Лихоманова

Коллектив ААНИИ и редколлегия журнала «Проблемы Арктики и Антарктики» понесли тяжелую утрату. После тяжелой болезни ушел из жизни заведующий отделом ледовых качеств судов Владимир Алексеевич Лихоманов.

Владимир Алексеевич Лихоманов окончил в 1965 г. Ленинградский кораблестроительный институт, получив специальность инженера-кораблестроителя, и 1 марта 1965 г. был принят на работу в ААНИИ в лабораторию ледовых качеств судов. В свою первую арктическую экспедицию Владимир Алексеевич отправился летом 1965 г., а в 1967 г. был направлен в Арктику начальником экспедиции.

Владимир Алексеевич почти 60 лет посвятил институту. Начав с должности инженера, в разные годы он был младшим научным сотрудником, старшим инженером, старшим научным сотрудником, руководителем лаборатории. С 1985 г. он успешно руководил сначала лабораторией, а с 1990 г. — отделом ледовых качеств судов.

Экспедиционная деятельность Владимира Алексеевича насчитывает около 40 рейсов в Арктику. Основной сферой деятельности Владимира Алексеевича являлось исследование ледовой ходкости и ледовой прочности судов.

Владимир Алексеевич работал также и в Антарктике. В частности, в 1985 г. он принимал участие в операции по спасению НЭС «Михаил Сомов» из ледового плена в ледяном массиве в районе антарктической станции «Русская», а в 1987 г. — в первом антарктическом рейсе нового НЭС для САЭ «Академик Федоров».

Деятельность Владимира Алексеевича в ААНИИ не ограничивалась только участием в многочисленных экспедициях. Под его руководством в 1990 г. был введен в строй уникальный экспериментальный центр на базе ОЛКС ААНИИ — комплекс ледовых бассейнов, который включает большой ледовый бассейн, малый ледовый бассейн, низкотемпературные камеры.

Именно Владимир Алексеевич предложил идею создания особого судна, которое стало бы плавучей платформой для базирования научно-исследовательских станций типа «Северный полюс». Под его руководством были разработаны технические требования и концепт-проект платформы, на этапах проектирования и строительства ледостойкой самодвижущейся платформы (ЛСП) в ледовом бассейне ААНИИ выполнялись уникальные модельные испытания по воздействию на ЛСП ледовых сжатий, были выданы рекомендации по улучшению формы корпуса.

Успешная продолжительная трудовая деятельность Владимир Алексеевич многократно отмечалась грамотами и благодарностями. Он награжден знаком «Почетный полярник», знаком «Почетный работник гидрометслужбы России», орденом «Знак почета», медалью «Ветеран труда». А за работы по созданию ЛСП он был награжден орденом Дружбы.

Владимир Алексеевич навсегда останется для нас примером настоящего человека, мудрого руководителя, замечательного коллеги и друга, способного поддержать и помочь в трудную минуту.

Редколлегия журнала

Памяти Галины Вячеславовны Сурковой

Второго февраля 2024 г. на 52-м году жизни скончалась Галина Вячеславовна Суркова, заместитель главного редактора журнала «Проблемы Арктики и Антарктики», профессор кафедры метеорологии и климатологии Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, доктор географических наук.

Галина Вячеславовна была известным ученым, чья научная биография неразрывно связана с кафедрой метеорологии и климатологии МГУ, которую она закончила в 1994 г. Научные исследования Г.В. Сурковой всегда были связаны с решением сложных, наукоемких проблем. Так было и в годы учебы в аспирантуре ИГ РАН, когда она создала пространственно-детализированную модель пограничного слоя атмосферы, которая легла в основу ее кандидатской диссертации «Моделирование региональных палеоклиматических изменений» (1998). И в период работы на кафедре МГУ, когда Галина Вячеславовна занималась атмосферной химией, работами по анализу изотопов кислорода и водорода для задач палеоклиматологии, в подготовке и публикации учебника «Химия атмосферы», который выдержал два переиздания. Параллельно она работала в области климатологии, где ею были подготовлены базовый учебник «Климатология» (четыре переиздания) и соответствующий курс лекций. Результаты этих климатологических исследований обобщены в ее докторской диссертации «Климатические ресурсы и их прогнозируемые изменения в XXI веке в России» (2018).

В 2021 г. Г.В. Суркова была приглашена войти в редакционную коллегию журнала «Проблемы Арктики и Антарктики» на должность заместителя главного редактора по направлению «метеорология и климатология». За то короткое время, что она пребывала в этой должности, она всегда с высокой ответственностью относилась к своим обязанностям, что позволило опубликовать ряд интересных оригинальных статей в рамках данного направления исследований полярных регионов планеты.

До последних дней редакция работала с Галиной Вячеславовной над ее собственной статьей, выходящей в данном номере журнала, — «Региональные особенности повторяемости гололеда на севере европейской территории России на фоне меняющегося климата».

Галина Вячеславовна была творческим человеком — писала хорошие стихи, пела и играла на гитаре, участвовала в театральных постановках Эстрадного театра Дома ученых и Музыкального театра ИХФ РАН.

В памяти коллег Галина Вячеславовна всегда останется преданной своей профессии, МГУ, семье, надежным и настоящим другом, мудрым наставником, умным и приятным в общении человеком, красивой и обаятельной женщиной.

Приносим искренние соболезнования родным и близким Галины Вячеславовны, ее коллегам.

Редколлегия журнала

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ
ЖУРНАЛА «ПРОБЛЕМЫ АРКТИКИ И АНТАРКТИКИ»

В журнале публикуются оригинальные статьи по тематике исследований полярных областей, а также научные сообщения теоретического, методического, экспериментального и прикладного характера, тематические обзоры (по заказу редакции). Тексты статей должны быть на русском или английском языке. Журнал рассматривает только те статьи, которые ранее не были опубликованы и не находятся на рассмотрении в других изданиях.

Все материалы направляются в редакцию в электронном виде онлайн через личный электронный кабинет автора на сайте журнала https://www.aaresearch.science. Авторы должны представить текст статьи со вставленными рисунками, а также отдельно оригинальные файлы рисунков (см. требования к рисункам), Акт экспертизы о возможности публикации статьи в открытой печати и файл с полными сведениями об авторах: фамилия, имя и отчество (полностью), место работы (полный адрес), ученая степень, должность, адрес электронной почты и телефон одного из авторов для связи. Рекомендуемый объем статей — от 8 до 20 страниц текста (через 1,5 интервала), включая таблицы и список литературы; рисунков не более 6, таблиц не более 6. Текст набирается в формате Microsoft Word. Параметры набора: шрифт Times New Roman, кегль 12, интервал 1,5. Страницы в статье нумеруются.

Все поступающие материалы проходят проверку на отсутствие заимствований в соответствии с этическими правилами публикаций с помощью системы «Антиплагиат».

Все статьи проходят двойное рецензирование.

Публикация в нашем журнале полностью бесплатна.

Структура статьи

Статьи оформляются следующим образом. Сначала дается УДК; затем на русском языке — название статьи, инициалы и фамилии всех авторов (при указании авторов статьи сначала идут инициалы, затем фамилия. Инициалы и фамилия разделяются пробелом), полное название организации(ций), где выполнена работа и ее (их) адрес; электронный адрес автора, ответственного за связь с редакцией. Далее продолжается информация на русском языке: краткая аннотация (7–10 строк) (без перевода на английский) и ключевые слова в алфавитном порядке (не более 10).

Затем те же сведения приводятся на английском языке: заглавие, авторы, учреждения, второй раз e-mail главного автора. При этом имена авторов даются полностью, отчество сокращенно. После этого на английском языке авторский Abstract статьи на 20–25 строк (здесь же для контроля обязательно прилагается перевод Abstract на русский язык) и ключевые слова в соответствии с английским алфавитом (не более 10 слов и не более двух слов в сочетаниях).

Abstract должно быть понятно без обращения к самой публикации как независимый от статьи источник информации. Оно должно отвечать следующим критериям: информативности (не содержать общих слов); содержательности (отражать основное содержание статьи: задачи работы, методы, главные результаты исследований); последовательности изложения. Перевод Abstract на английский язык должен быть выполнен качественно, с использованием англоязычной специальной терминологии, не быть дословным переводом русскоязычной версии (при необходимости следует также включать пояснения для иностранного читателя, связанные со спецификой исследований).

Аннотация на русском языке и Abstract должны быть структурированными, т. е. отражать кратко проблему исследования и ее состояние, цель работы, методы, результаты и заключение.

Для статьи, представляемой на английском языке, требуются: УДК; перевод на русский язык всей информации, которая дается перед началом статьи в журнале. Кроме того, в конце статьи необходимо привести расширенный русский реферат (1–1,5 стр.), а в подписях к рисункам дать их перевод на русский язык.

Основной текст разбивается на разделы. Обычно это введение с описанием научной проблесы, методика исследований, результаты исследований, обсуждение результатов, заключение (выводы). В конце статьи нужно поместить следующую информацию на двух языках: Конфликт интересов/Competing interests; Финансирование/Funding; Благодарности/Acknowledgments. Желательно также указать вклад авторов в работы — Вклад авторов/Authors contribution. В разделе Финансирование необходимо указать источник финансовой поддержки, способствовавший выполнению этой работы (гранты фондов, программы и т.д.), в Благодарностях можно поместить благодарность лицам, оказавшим помощь в подготовке статьи.

Подписи под рисунками даются к каждому рисунку в соответствии с его расположением в тексте: сначала на русском (Рис. 1. Далее подпись), а потом на английском языке (Fig. 1. Figure caption). В подписях необходимо отделять собственно название рисунка от объяснений к нему (экспликация), которые надо давать с новой строки.

Рисунки и фотографии помещают в отдельных файлах: для растровых изображений в растровых форматах JPEG/TIFF/PNG/PSD, в векторных — CDR, AI, EPS и в формате XLS (не допускаются рисунки в формате Word). Разрешение растровых изображений в оттенках серого и RGB-цвет должно быть 300 dpi. Все текстовые надписи на рисунках даются только на русском языке, для статей на английском — соответственно — на английском. Для статей на русском языке все условные знаки обозначаются цифрами (курсивом) с обязательной расшифровкой в подрисуночных подписях, где они также обозначаются курсивом. Цифры можно ставить и на линиях графиков. На графиках все шкалы обязательно подписываются и указывается размерность величин.

Таблицы. Для больших таблиц следует использовать альбомную разметку страницы. Номер и наименование таблицы (два отдельных абзаца) приводятся на русском и английском языках. Заголовок таблицы не должен превышать ДВУХ строк.

Таблицы и графы должны иметь заголовки, сокращения слов в таблицах не допускаются. Таблицы набираются, как и текст, в формате Word шрифтом 9 пт. Если у таблицы есть примечание, оно тоже приводится на двух языках. Примечания внутри таблицы не даются. Используются сноски ко всей таблице или отдельным ее показателям.

В тексте следует давать ссылки на все рисунки и таблицы. При первой ссылке — рис. 1, табл. 1; при повторных — см. рис.1, см. табл. 1. Если в тексте дается одна таблица или один рисунок, то ссылки в тексте приводятся следующим образом: при первой ссылке — (таблица), (рисунок); при повторной ссылке — (см. таблицу), (см. рисунок).

Математические обозначения, символы и простые формулы рекомендуется набирать основным шрифтом статьи, сложные формулы — в программе MathType (или в версиях Word до 2007 года включительно). Нумеруются только те формулы, на которые есть ссылки в тексте. Русские и греческие буквы в формулах и тексте, а также химические элементы набираются прямым шрифтом, латинские буквы — курсивом. Аббревиатуры в тексте, кроме общепринятых, не допускаются.

При подаче статьи в журнал автор должен проверить точность и правильность оформления *списка литературы.*

Редакция может отказать автору в приеме рукописи к дальнейшему рассмотрению при плохом качестве списка литературы, в частности:

– при преобладании ссылок на малоизвестные источники, отсутствующие в МНБД, на недоступные источники, на собственные работы (больше 30 %);

– при наличии ошибок в описании: пропуск автора или неверное написание его ФИО, неточное название статьи/книги, неполные или неверные выходные сведения (том, номер, страницы, год издания, не указанный DOI).

Все приведенные в статье цитаты должны быть выверены по первоисточникам с указанием страницы (например, [17, с. 37]). Также должны быть тщательно выверены все библиографические данные (ФИО автора/ов, название статьи/книги, том, номер журнала, страницы, издательство, год издания, DOI, полный интернет-адрес, по которому доступен текст статьи/книги (URL), дата обращения к сайту). Полные интернет-адреса (URL) должны быть приведены для всех ссылок, где это возможно.

Для оригинальных научных статей необходимо упоминание не менее 10 и, желательно, не более 25–30 источников, для научного обзора — не менее 50 источников. Желательно использование не менее 30 % англоязычных источников за последние 10–15 лет.

В соответствии с этикой научных публикаций рекомендуется, чтобы в списке литературы ссылки на собственные работы не превышали 30 % от общего количества источников.

В списки литературы включаются только рецензируемые источники (статьи из научных журналов и монографии), использованные при подготовке статьи.

В связи с новыми практиками расчета рейтингов научных журналов в Список литературы не рекомендуется включать:

– кандидатские и докторские диссертации, их авторефераты (нужно цитировать статьи, опубликованные в процессе подготовки диссертации и включающие материал из нее);

– материалы конференций;

– статьи из нерецензируемых журналов, а также журналов, исключенных из ВАК, баз РИНЦ;

– ссылки на труднодоступные, неопубликованные, малотиражные, а также локальные, популярные и образовательные источники:

– неоцифрованные, отсутствующие в сети старые учебные пособия, сборники трудов, монографии;

– методические пособия, техническую документацию, ГОСТЫ;

– недолговечные WEB-страницы.

– ссылки на статью в печатном СМИ, тексты на сайте или в блогах.

При необходимости для вышеперечисленных категорий можно использовать внутритекстовые полные библиографические ссылки (оформляются в круглых скобках в стиле списка литературы) в количестве не более трех на публикацию. Впоследствии при наличии технической возможности в макете они могут быть заменены на сноски.

В журнале принят Ванкуверский стиль цитирования (отсылка в тексте в квадратных скобках, полное библиографическое описание источника в списке литературы в порядке упоминания в тексте статьи).

В соответствии с требованиями мировых научных баз данных реферативной и аналитической информации наряду со списком литературы на русском языке необходимо представить библиографический список статей и доступных монографий также на английском языке.

С января 2024 г. мы используем стиль оформления ссылок, в котором под единым номером списка объединены ранее приводившиеся в Списке литературы и в References описания библиографических ссылок одного и того же источника.

Примеры оформления

Статья на русском языке

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. *Kriosfera Zemli = Earth's Cryosphere.* 2021;25(6):41–50. (In Russ.) https://doi.org/10.15372/KZ20210604

Статья на английском языке

Nitze I., Heidler K., Barth S., Grosse G. Developing and testing a deep learning approach for mapping retrogressive thaw slumps. *Remote Sensing.* 2021;13(21):4294. https://doi.org/10.3390/rs13214294

Монография на русском языке

Лейбман М.О., Кизяков А.И. *Криогенные оползни Ямала и Югорского полуострова*. М.: Институт криосферы земли СО РАН; 2007. 206 с.

Монография на иностранном языке

Kelley M. C. *The Earth's ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics.* San Diego, CA, USA: Academic Press; 1989. 556 p.

Глава из монографии

Leibman M., Khomutov A., Kizyakov A. Cryogenic landslides in the West-Siberian plain of Russia: classification, mechanisms, and landforms. In: W. Shan et al. (eds.). *Landslides in cold regions in the context of climate change. Environmental Science and Engineering.* Springer International Publishing, Switzerland; 2014. P. 143–162.

Монография, переведенная на английский язык

Аэрозоль и климат. Под ред. К.Я. Кондратьева. Л.: Гидрометеоиздат; 1991. 541 с.

Kondratyev K.Ya., Ivlev L.S., Krapivin V.F., Varotsos C.A. *Atmospheric aerosol properties, formation processes, and impacts: from nano- to global scales.* Chichester: Springer/PRAXIS; 2006. 572 p.

Монографии без авторов

Kokhanovsky A., Tomasi C., editors. *Physics and Chemistry of the Arctic Atmosphere. Springer Polar Sciences series.* Cham: Springer; 2020. 717 p. https:// doi.org/10.1007/978-3-030-33566-3

Ссылки на интернет-ресурсы

Global Modeling and Assimilation Office (GMAO). MERRA-2 tavg1_2d_aer_Nx: 2d, 1-Hourly,Time-averaged,Single-Level,Assimilation,Aerosol Diagnostics

V5.12.4, Greenbelt, MD, USA, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC). 2015. URL: https://10.5067/KLICLTZ8EM9D (accessed 15.04 2023)

Тезисы конференции (при острой необходимости).

Макаров Е.И., Саперштейн Е.Б., Фролов С.В., Федяков В.Е. Разработка сценариев для тактического планирования транзитных рейсов газовозов в ледовых условиях в акватории СМП. В кн.: *Труды 15-й Международной конференции и выставки по освоению ресурсов нефти и газа Российской Арктики и континентального шельфа стран СНГ (RAO/CIS Offshore 2021), 21–24 октября 2021.* СПб.; 2021. С. 181–187.

Если статья опубликована в журнале, имеющем русскую и английскую версии, то библиографические данные в References следует приводить из английской версии журнала:

Виноградова А.А., Васильев А.В., Иванова Ю.А. Загрязнение воздуха черным углеродом в районе о-ва Врангеля: сравнение источников и вкладов территорий Евразии и Северной Америки. *Оптика атмосферы и океана.* 2020; 33(12):907–912. https:// doi.org:10.15372/AOO20201201

Vinogradova A.A., Vasileva A.V., Ivanova Yu.A. Air pollution by black carbon in the region of Wrangel Island: comparison of Eurasian and American sources and their contributions. *Atmospheric and Oceanic Optics.* 2021;34(2): 97–103. https:// doi.org: 10.1134/S1024856021020111

Для статей из нашего журнала отметим, что с 2018 г. название журнала на английском языке — *Arctic and Antarctic Research*. До 2018 г. название на английском было *Problemy Arktiki i Antarctiki*

Статьи, не соответствующие указанным требованиям, рассматриваться не будут. При работе над рукописью редакция по согласованию с автором вправе ее сократить. Автор, подписывая статью и направляя ее в редакцию, тем самым передает авторские права на издание этой статьи журналу «Проблемы Арктики и Антарктики / Arctic and Antarctic Research».

Редакционная коллегия не вступает в дискуссии с авторами по поводу принимаемых ею решений.

Более полные сведения по оформлению статьи приведены в документе «Требования к оформлению статей, присылаемых в журнал Проблемы Арктики и Антарктики», который обязателен для ознакомления при подготовке материалов статьи.

Об Аннотациях. Редакция рекомендует всем авторам ознакомиться с Рекомендациями по оформлению аннотаций на английском языке, которые являются для иностранных ученых и специалистов основным и, как правило, единственным источником информации о содержании статьи и изложенных в ней результатах исследований.

Подписано в печать 27.03.2024
Формат 70×100 1/16
Тираж 85

Печать цифровая
Печ. л. 8,625
Заказ №

ООО «Репроцентр»,
170006, Россия, г. Тверь, Беляковский переулок, д. 46, пом. 25.

Signed to print 27.03.2024
Format 70×100 1/16
Edition 85

Digital Printing
P.s. 8,625
Order No

LLC “Reprocenter”,
170006, Russia, Tver, Belyakovsky lane, 46, office 25.