

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 68, № 2, 2022

**ARCTIC AND ANTARCTIC
RESEARCH**
Volume 68, No 2, 2022

Санкт-Петербург
2022
Saint Petersburg

Журнал продолжает основанное в 1937 г. периодическое издание «Проблемы Арктики».
Выходит 4 раза в год. ISSN 0555-2648 (Print), ISSN 2618-6713 (Online)
Журнал издается под научно-методическим руководством Отделения наук о Земле РАН

Префикс DOI: 10.30758



Журнал публикует новые результаты комплексных 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.

СОСТАВ РЕДКОЛЛЕГИИ:

**Главный редактор — д-р физ.-мат. наук В.В. Иванов,
Москва, Россия**

Заместители главного редактора:

д-р геол.-минерал. наук **Г.И. Лейченко** (Санкт-Петербург, Россия)
канд. геогр. наук **В.Я. Липенков** (Санкт-Петербург, Россия),
д-р геогр. наук **Г.В. Суркова** (Москва, Россия)

Члены редколлегии:

д-р геогр. наук **Г.В. Алексеев** (Санкт-Петербург, Россия)
канд. физ.-мат. наук **Л.П. Бобылев** (Санкт-Петербург, Россия)
чл.-корр. РАН **Н.Б. Вахтин** (Санкт-Петербург, Россия)
д-р геогр. наук **М.Н. Григорьев** (Якутск, Россия)
д-р биол. наук **С.Г. Денисенко** (Санкт-Петербург, Россия)
д-р **Д.В. Дивин** (Тромсё, Норвегия)
академик РАН **С.А. Добролюбов** (Москва, Россия)
чл.-корр. РАН **Е.О. Дубинина** (Москва, Россия)
д-р физ.-мат. наук **В.М. Катцов** (Санкт-Петербург, Россия)
д-р физ.-мат. наук **Б.В. Козелов** (Мурманск, Россия)
д-р геол.-минерал. наук **М.О. Лейбман** (Тюмень, Россия)
проф. **М. Леппаранта** (Хельсинки, Финляндия)
канд. техн. наук **В.А. Лихоманов** (Санкт-Петербург, Россия)
академик НАН **В.Ф. Логинов** (Минск, Беларусь)

д-р физ.-мат. наук **А.П. Макштас** (Санкт-Петербург, Россия)
проф. **А.В. Марченко** (Лонгйир, Норвегия)
д-р геогр. наук **Е.У. Миронов** (Санкт-Петербург, Россия)
канд. геогр. наук **В.Ф. Радионов** (Санкт-Петербург, Россия)
проф. **Д. Райно** (Гренобль, Франция)
д-р техн. наук **К.Е. Сазонов** (Санкт-Петербург, Россия)
д-р техн. наук **К.Г. Ставров** (Санкт-Петербург, Россия)
профессор **П.Г. Талалай** (Чаньчунь, Китай)
д-р физ.-мат. наук **Л.А. Тимохов** (Санкт-Петербург, Россия)
д-р физ.-мат. наук **О.А. Трошичев** (Санкт-Петербург, Россия)
чл.-корр. РАН **Н.Н. Филатов** (Петрозаводск, Россия)
академик РАН **М.В. Флинт** (Москва, Россия)
д-р геогр. наук **К.В. Чистяков** (Санкт-Петербург, Россия)

Редакционный совет:

д-р геогр. наук **А.С. Макаров** (Санкт-Петербург, Россия) (Председатель)
академик РАН **В.Д. Каминский** (Санкт-Петербург, Россия), академик РАН **Г.Г. Матишов** (Ростов-на-Дону, Россия),
академик РАН **В.М. Котляков** (Москва, Россия), академик РАН **О.Н. Пугачев** (Санкт-Петербург, Россия),
академик РАН **В.А. Румянцев** (Санкт-Петербург, Россия), чл.-корр. РАН **А.А. Тишков** (Москва, Россия)

Ответственный секретарь — канд. биол. наук **И.А. Алехина**

Литературный редактор — **Е.В. Миненко**

Оригинал-макет и подготовка к печати: **А.А. Меркулов**.

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.

Выданы Федеральной службой по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций

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 25.00.29, 25.00.30, 1.6.8, 1.6.14, 1.6.16, 1.6.17.

Адрес редакции журнала «Проблемы Арктики и Антарктики»:

199397 Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38.

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

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт.

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

Подписной индекс издания в каталоге ООО «Урал-Пресс»

48657 – на полгода

© ГНЦ РФ ААНИИ, 2022; © Росгидромет, 2022.

The journal continues the series of “Arctic Research”, founded in 1937.
Four issues per year. ISSN 0555-2648 (Print), ISSN 2618-6713 (Online)
The journal is published under the scientific and methodological guidance of the Earth Sciences Division
of the Russian Academy of Sciences

DOI-prefix: 10.30758



The Journal 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.

EDITORIAL BOARD:

Editor-in-Chief – Vladimir V. Ivanov
Dr of Sci. (Physics and mathematics),
Moscow, Russia

Deputy of the Editor-in-Chief:

German L. Leitchenkov, Dr. of Sci. (Geology and mineralogy), St. Petersburg, Russia
Vladimir Ya. Lipenkov, Cand. of Sci. (Geography), St. Petersburg, Russia;
Galina V. Surkova, Dr. of Sci. (Geography), Moscow, Russia

Members of the editorial board:

Genrikh V. Alekseev , Dr. of Sci., St. Petersburg, Russia	Vladimir A. Likhomanov , Cand. of Sci., St. Petersburg, Russia
Leonid P. Bobylev , Cand. of Sci., St. Petersburg, Russia	Vladimir F. Loginov , academician, Dr. of Sci., Minsk, Belarus
Kirill V. Chistyakov , Dr. of Sci., St. Petersburg, Russia	Alexander P. Makshtas , Dr. of Sci., St. Petersburg, Russia
Stanislav G. Denisenko , Dr. of Sci., St. Petersburg, Russia	Alexey V. Marchenko , Dr. of Sci., Longyearbyen, Norway
Dmitry V. Divine , Cand. of Sci., Tromsø, Norway	Evgeny U. Mironov , Dr. of Sci., St. Petersburg, Russia
Sergey A. Dobrolyubov , academician, Dr. of Sci., Moscow, Russia	Vladimir F. Radionov , Cand. of Sci., St. Petersburg, Russia
Elena O. Dubinina , RAS corr. member, Moscow, Russia	Dominique Raynaud , Prof. emer., Grenoble, France
Nikolay N. Filatov , RAS corr. member, Petrozavodsk, Russia	Kirill E. Sazonov , Dr. of Sci. St., Petersburg, Russia
Mikhail V. Flint , academician, Dr. of Sci., Moscow, Russia	Konstantin G. Stavrov , Dr. of Sci., St. Petersburg, Russia
Mikhail N. Grigoriev , Dr. of Sci., Yakutsk, Russia	Pavel G. Talalay , Prof., Dr. of Sci., Changchun, PRC
Vladimir M. Kattsov , Dr. of Sci., St. Petersburg, Russia	Leonid A. Timokhov , Dr. of Sci., St. Petersburg, Russia
Boris V. Kozelov , Dr. of Sci., Murmansk, Russia	Oleg A. Troshichev , Dr. of Sci., St. Petersburg, Russia
Marina O. Leibman , Dr. of Sci., Tyumen, Russia	Nikolay B. Vakhtin , RAS corr. member, St. Petersburg, Russia
Matti Leppäranta , Ph.D., Prof. emer., Helsinki, Finland;	

Editorial Council:

Alexander S. Makarov, Dr. of Sci., St. Petersburg, Russia (Chair)
Valery D. Kaminsky, academician, St. Petersburg, Russia;
Vladimir M. Kotlyakov, academician, Moscow, Russia;
Genady G. Matishov, academician, Rostov on the Don;
Oleg N. Pugachev, academician, St. Petersburg, Russia;
Vladislav A. Rumiantsev, academician, St. Petersburg, Russia;
Arkady A. Tishkov, RAS corr. member, Moscow, Russia

Executive Secretary – **Irina A. Alekhina**

Literary Editor – **Elena V. Minenko**

Original layout and preparation for printing: **Alexander A. Merkulov**.

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

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

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

The Journal is licenced and indexed by the Supreme Certification Commission in Moscow (VAK). The Journal publishes papers on the next scientific specialties of the Supreme Certification Commission: 25.00.29, 25.00.30, 1.6.8, 1.6.14, 1.6.16, 1.6.17.

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>

Subscription index of the journal catalog “Ural-Press” 48657 – for half a year

© SSC RF AARI, 2022; © Roshydromet, 2022.

Содержание

ОКЕАНОЛОГИЯ

Е.В. Афанасьева, С.С. Сероветников, Т.А. Алексеева, Е.А. Гришин, А.А. Солодовник, Н.А. Филиппов. Применение данных судового телевизионного комплекса в оперативном гидрометеорологическом обеспечении морской деятельности на примере картирования толщины ледяного покрова в Арктике 96

А.В. Весман, Б.В. Иванов. Характерные типы ледовых условий к северу от архипелага Шпицберген 118

ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ

В.В. Зуев, Е.С. Савельева. Взаимосвязь между площадью и скоростью ветра по границе антарктического полярного вихря 133

МЕТЕОРОЛОГИЯ И КЛИМАТОЛОГИЯ

С.В. Саливончик, С.В. Какарека. Анализ трендов климатических показателей по данным наземных метеонаблюдений и реанализа на Земле Эндерби, Восточная Антарктика..... 142

ГИДРОЛОГИЯ СУШИ И ГИДРОХИМИЯ

A.V. Guzeva, I.R. Elizarova, A.E. Lapenkov, Z.I. Slukovskii. Fractions of trace metals in the sediments of permafrost-affected lakes in Northern Siberia, Lena delta 160

В.А. Румянцев, А.В. Измайлова. Районирование Арктической зоны РФ как основа разработки системы наблюдений за пресными водами 173

ЭКОЛОГИЯ, БИОЦЕНОЛОГИЯ И БИОГЕОГРАФИЯ

И.А. Мельников, Л.С. Житина, В.В. Иванов, А.Б. Тимофеева. Ледовые водоросли в условиях современного состояния водно-ледовой среды Арктического бассейна..... 191

Contents

OCEANOLOGY

E.V. Afanasyeva, S.S. Serovetnikov, T.A. Alekseeva, E.A. Grishin, A.A. Solodovnik, N.A. Filippov. Mapping the thickness of sea ice in the Arctic as an example of using data from a ship-based television complex for operational hydrometeorological support of maritime activities 96

A.V. Vesman, B.V. Ivanov. Types of sea ice conditions north of Spitzbergen archipelago118

ATMOSPHERE AND HYDROSPHERE PHYSICS

V.V. Zuev, E.S. Saveliyeva. Relationship between area and wind speed along the edge of the Antarctic polar vortex 133

METEOROLOGY AND CLIMATOLOGY

S.V. Salivonchik, S.V. Kakareka. Analysis of trends of meteoroclimatic characteristics at Enderby Land, East Antarctica based on land observations data and reanalysis 142

HYDROLOGY OF LAND AND HYDROCHEMISTRY

A.V. Guzeva, I.R. Elizarova, A.E. Lapenkov, Z.I. Slukovskii. Fractions of trace metals in the sediments of permafrost-affected lakes in Northern Siberia, Lena delta 160

V.A. Rumyantsev, A.V. Izmailova. Zoning of the Arctic zone of the Russian Federation as the basis for the development of a fresh water observation system 173

ECOLOGY, BIOGEOLOGY AND BIOGEOGRAPHY

I.A. Melnikov, L.S. Zhitina, V.V. Ivanov, A.B. Timofeeva. Ice algae in current water-ice environmental condition of the Arctic Ocean 191

ОКЕАНОЛОГИЯ
OCEANOLOGY

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-2-96-117>
УДК 551.467



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

**Применение данных судового телевизионного комплекса
в оперативном гидрометеорологическом обеспечении
морской деятельности на примере картирования толщины
ледяного покрова в Арктике**

Е.В. Афанасьева^{1,2}, С.С. Сероветников¹, Т.А. Алексеева^{1,2}, Е.А. Гришин¹,
А.А. Солодовник¹, Н.А. Филиппов¹*

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

² — Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

**afanasieva@aari.ru*

Резюме

В работе поднят вопрос о необходимости получения достоверных натуральных данных о толщине ледяного покрова для обеспечения более высокой точности информационной продукции, выпускаемой национальными ледовыми службами, в частности ледовых карт, которые являются базовым элементом оперативного гидрометеорологического обеспечения морской деятельности в пределах Северного морского пути (СМП) и примыкающих к нему акваториях. Предложено решение проблемы путем размещения на современных атомных ледоколах и судах усиленного ледового класса Arc7 автоматизированных судовых телевизионных метеорологических комплексов (СТМК), позволяющих получать достоверные данные о толщине льда и других сопутствующих гидрометеорологических параметрах непосредственно во время движения судна во льдах. В настоящее время растущее число судов усиленного ледового класса является единственной доступной по экономическим причинам инфраструктурой, пригодной для развертывания наземной распределенной сети оперативного мониторинга гидрометеорологических условий на трассах СМП.

Ключевые слова: Арктика, дистанционное зондирование, ледовая карта, ледовая навигация, натурные измерения, Северный морской путь, судовый телевизионный комплекс, толщина льда.

Для цитирования: Афанасьева Е.В., Сероветников С.С., Алексеева Т.А., Гришин Е.А., Солодовник А.А., Филиппов Н.А. Применение данных судового телевизионного комплекса в оперативном гидрометеорологическом обеспечении морской деятельности на примере картирования толщины ледяного покрова в Арктике // Проблемы Арктики и Антарктики. 2022. Т. 68. № 2. С. 96–117. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-2-96-117>.

Поступила 19.05.2022

После переработки 06.06.2022

Принята 08.06.2022

Mapping the thickness of sea ice in the Arctic as an example of using data from a ship-based television complex for operational hydrometeorological support of maritime activities

Ekaterina V. Afanasyeva^{1,2*}, Sergei S. Serovetnikov¹, Tatiana A. Alekseeva^{1,2}, Evgeniy A. Grishin¹, Aleksandr A. Solodovnik¹, Nikita A. Filippov¹

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

² — Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*afanasieva@aari.ru

Summary

Sea ice charts produced by the ice services of the world are among the most widely used sources of information about sea ice conditions in the Arctic. The absolute majority of sea ice charts are based on visual expert analysis of satellite imagery accompanied by auxiliary data including ground information from coastal stations and ships navigating the Northern Sea Route (NSR). Ground measurements of sea ice thickness are necessary for validating the results of satellite imagery interpretation. Shipboard observations are highly valuable because, unlike coastal stations, the ships provide information about sea ice cover straight on the navigational routes, not in the coastal areas of land-fast ice, where the thickness values are not fully representative of the ice in the open sea. However, the current system of shipboard observations used by commercial fleets often does not meet the reliability requirements due to the human factor involved in the process of data collection.

In the early 2000s, the Arctic and Antarctic Research Institute (AARI) suggested a new methodology for shipboard ice thickness measurement. A ship-based television complex (STC) was developed in order to exclude the human factor and standardize observations. The inaccuracy value was estimated as 3.8 % of the real thickness. By 2018, STC had been upgraded to a new ship-based television meteorological complex (STMC) allowing continuous automatic measurement of ice thickness and many other related hydrometeorological parameters during the entire voyage.

The automatic and autonomous operation of the new equipment allows placing it on board the ship without the need for an ice specialist to be permanently present. It means that STMC can be used by commercial fleets, which constantly increase the number of Arc7 ice class vessels they use. For economic reasons, reinforced ice class vessels, whose number is growing, represent the only available infrastructure suitable for the deployment of distributed network providing operational hydrometeorological monitoring on the NSR.

A comparison of STC data with AARI ice charts has revealed that real-time transmission of STC data from ships to the ice service office could increase the accuracy of ice charts and, as a consequence, the quality of the entire system of hydrometeorological informational support of maritime activities in the Arctic.

Keywords: the Arctic, ground measurements, ice thickness, Northern Sea Route, remote sensing, sea ice chart, sea ice navigation, ship-based television complex.

For Citation: Afanasyeva E.V., Serovetnikov S.S., Alekseeva T.A., Grishin E.A., Solodovnik A.A., Filippov N.A. Mapping the thickness of sea ice in the Arctic as an example of using data from a ship-based television complex for operational hydrometeorological support of maritime activities. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2022, 68 (2): 96–117. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-2-96-117>.

Received 19.05.2022

Revised 06.06.2022

Accepted 08.06.2022

ВВЕДЕНИЕ

Ледовые карты, выпускаемые ледовыми службами мира, являются одним из основных источников информации о состоянии ледяного покрова Арктики. Ледовые карты содержат в себе информацию о таких характеристиках ледяного покрова,

как общая сплоченность, возрастной состав льда (что является относительным показателем толщины), горизонтальные размеры ледяных полей, а также положение границы припайного льда. В данной работе мы сфокусируемся на толщине ледяного покрова как основном лимитирующем факторе для судоходства в пределах Северного морского пути (СМП) и других замерзающих акваторий.

Хорошо известно, что подавляющее большинство ледовых карт, выпускаемых национальными ледовыми службами, представляет собой результат визуального экспертного анализа спутниковых изображений, получаемых в различных диапазонах электромагнитного спектра, а именно: видимом, инфракрасном (ИК) и микроволновом (включает в себя пассивную и активную съемку), с привлечением вспомогательной гидрометеорологической информации с береговых станций и судов [1]. На сегодняшний день такие ледовые карты считаются наиболее достоверным видом информационной продукции. Некоторые ледовые службы, как, например, норвежская [2], достигли некоторых успехов в области автоматизации анализа спутниковых изображений, однако достижения эти касаются картирования общей сплоченности ледяного покрова, и авторы также указывают на то, что данный вид информационной продукции «производится без участия человека и не имеет гарантий качества» [2, раздел “Automatic Sea Ice Analysis”]. Карты в ледовых службах мира по-прежнему основываются на визуальном анализе спутниковых изображений, выполняемом ледовыми экспертами, имеющими соответствующую квалификацию. Данный тезис подтверждается также специалистами ледовой службы Канады: «Несмотря на... длинную историю развития автоматизированных методов, ледовые службы по-прежнему полагаются на карты, создаваемые экспертами вручную, для определения ледовых условий...» [3, с. 1291]. Хотя речь в работе канадских специалистов идет об общей сплоченности льда, данный тезис, даже в большей степени, справедлив и для картирования возрастного состава льда. Определение возраста льда представляет собой намного более сложную задачу, для ее решения необходимо учитывать очень большое число факторов, всю совокупность которых машинные алгоритмы учесть не способны.

Как говорилось выше, вся собранная спутниковая информация всегда анализируется в комплексе с вспомогательными данными, которые включают в себя данные о погоде (температура воздуха, скорость и направление приводного ветра), расчетное поле дрейфа льда с момента предшествующего анализа, натурные измерения толщины припайного льда в районах береговых станций, а также данные наблюдений за ледовой обстановкой, поступающие с судов, находящихся в пределах анализируемых акваторий.

Следует отдельно отметить ценность натуральных наблюдений, которые поступают с береговых станций и судов. По сути, при анализе спутниковых изображений они выступают в качестве реперных. Особенно большой ценностью обладают данные судовых наблюдений, поскольку они выполняются в дрейфующих льдах непосредственно в районах судоходных трасс. Наблюдения на береговых станциях выполняются на припайном льду, что в большинстве случаев не вполне репрезентативно для дрейфующих льдов на удалении от берега.

При наличии достоверных натуральных данных эксперт, анализирующий спутниковые изображения, сопоставляет яркостные, тональные и текстурные характеристики льда, толщина которого известна, с яркостью, тоном и текстурой льда, находящегося в пределах сцены спутниковой съемки. Это помогает более успешно определять возраст ледяного покрова. Очевидно, что расширение сети натуральных наблюдений напрямую бы способствовало повышению точности экспертного анализа и, как следствие, точности ледовых карт, выпускаемых национальными ледовыми службами.

Отмечается, что на протяжении последних десятилетий в Арктике имеет место устойчивый рост судоходного траффика, что в первую очередь связано с существенным смягчением ледовых условий плавания в акватории СМП по сравнению с концом XX в., а также активным строительством и вводом в эксплуатацию атомных ледоколов нового поколения и большого числа судов усиленного ледового класса Arc7, предназначенных для транспортировки топливно-энергетических и других ресурсов, добываемых в Арктической зоне Российской Федерации. С учетом избранного курса развития российской экономики, в котором Арктической зоне отводится одно из ключевых мест, ожидается, что данная тенденция будет сохраняться.

Для национальных ледовых служб, занимающихся мониторингом ледовых условий в морях Российской Арктики, данная перспектива представляется положительной в том плане, что растущее число судов, способных круглый год курсировать вдоль трассы СМП и регулярно предоставлять оперативные данные о метеорологической и ледовой обстановке, в настоящее время является единственной доступной по экономическим причинам инфраструктурой, пригодной для организации распределенной сети оперативного мониторинга гидрометеорологических условий на трассе СМП и в прилегающих районах.

Однако, как будет показано ниже, система судовых ледовых наблюдений, действующая в настоящее время на судах коммерческого флота, часто не отвечает требованиям качества и достоверности. Это связано с рядом причин, среди которых отсутствие на борту штатного гидрометеоролога (его обязанности, как дополнительные, возложены на штурманский состав экипажей), отсутствие специальной подготовки по производству ледовых наблюдений и недостаток времени на дополнительные работы во время основной вахты.

В начале 2000-х гг. в Арктическом и антарктическом научно-исследовательском институте (ААНИИ) была предложена новая технология сбора натурных данных о толщине ледяного покрова непосредственно во время движения судна во льдах. С целью получения максимально достоверных оценок был разработан специальный инструмент — судовой телевизионный комплекс (СТК) [4], позволяющий нивелировать человеческий фактор в процессе сбора данных о толщине морского льда [5, 6].

Изначально СТК предназначался для сбора достоверных натурных данных о толщине льда в ходе высокоширотных арктических экспедиций ААНИИ и дальнейшего проведения научных исследований на основе собранного материала. К 2018 г. в проект СТК был внесен ряд значительных дополнений, позволяющих, помимо толщины льда, собирать информацию и о других гидрометеорологических характеристиках: температуре и относительной влажности воздуха, атмосферном давлении, скорости и направлении ветра, дальности видимости, высоте нижней границы облачности, общей сплоченности ледяного покрова, наличии сжатий во льду, а также о параметрах движения судна: географическом положении, скорости, курсе, задействованной мощности двигательных установок [7]. Модернизированная версия проекта получила название судовой телевизионный метеорологический комплекс (СТМК). В отличие от СТК, модернизированный комплекс предусматривает автоматическое функционирование, не требующее присутствия профильного специалиста на борту судна, а значит, оборудование может быть размещено на судах, состав экипажей которых не предусматривает наличия штатного гидрометеоролога, в том числе на судах коммерческого флота. При оперативной передаче данных СТМК на адрес национальной ледовой службы эти данные могут послужить источником чрезвычайно ценной и полезной информации для производства ледовых информационных продуктов, в частности ледовых карт, а также внести значительный вклад в улучшение качества выпускаемой продукции.

В настоящей работе мы обсудим потенциал автоматизированных судовых комплексов СТМК как источника достоверных натурных данных о толщине льда для нужд оперативного гидрометеорологического обеспечения в перспективе круглогодичной навигации в акватории СМП.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Карты ледовой обстановки ААНИИ

В качестве результата визуального экспертного анализа спутниковых изображений рассмотрим ледовые карты, которые регулярно составляются экспертами ААНИИ. Согласно информации из документа Всемирной метеорологической организации (ВМО) «Ледовые информационные службы мира» [8], а также публикации самих специалистов ААНИИ [1], ледовые карты составляются на основе комплексного анализа спутниковых изображений видимого и ИК диапазонов, радиолокационных изображений, а также данных спутниковой микроволновой радиометрии. Спутниковая информация анализируется в комплексе с вспомогательными данными о погоде, дрейфе льда, данными, поступающими с сети береговых станций Росгидромета, а также данными, передаваемыми на адрес ААНИИ с судов, работающих на трассах СМП и в других замерзающих морях, омывающих территорию России.

При анализе спутниковых изображений каждый ледовый эксперт руководствуется знанием уникальных дешифровочных признаков различных возрастных градаций (или типов) морского льда, регламентированных документом ВМО «Номенклатура ВМО по морскому льду» [9]. Дешифровочные признаки того или иного типа льда, изображенного на снимке, представляют собой сочетание тональных и текстурных характеристик в совокупности с общей структурой ледяного покрова. Под структурой здесь подразумеваются такие особенности, как, например, частота и взаимная ориентация каналов и разводий во льду, размер и форма встречающихся ледяных полей и т. п.

Экспертный анализ спутниковых изображений морского льда, по сути, заключается в обнаружении и выделении зон, ледовые условия внутри которых однородны, с последующим присвоением этим зонам соответствующих ледовых характеристик: сплоченность, возраст, размеры полей. Пример этого процесса приведен на рис. 1.

Дешифровочные признаки возрастных градаций льда приведены в ряде монографий и руководств по дешифрированию спутниковых изображений, опубликованных как отечественными, так и зарубежными авторами [10, 11]. Однако в реальной практике определение возраста морского льда зачастую бывает неоднозначно, так как характер его отображения может существенно отличаться от тех примеров, которые даны в руководствах. Проблема заключается в том, что отображение льда на спутниковых снимках определяется целым рядом параметров, среди них наслоенность, торосистость льда, фазовый состав ледяной толщи (количественное соотношение воды, льда и воздуха), количество морской соли во льду, высота снега на его поверхности и т. д., которые, в свою очередь, напрямую зависят от внешних условий формирования и развития ледяного покрова в природной среде. Условия эти могут быть самыми разнообразными. Формирование и развитие ледяного покрова может происходить и при сильном морозе, и при слабоотрицательных температурах воздуха; при штормовом ветре и на тихой воде; вблизи стока пресных речных вод и в открытом море; при интенсивных атмосферных осадках и при их отсутствии и т. д. При таком широком спектре внешних условий формируются льды, имеющие самые разнообразные дешифровочные признаки на спутниковых изображениях, что естественным образом усложняет процесс их дешифрирования. Более подробно теория

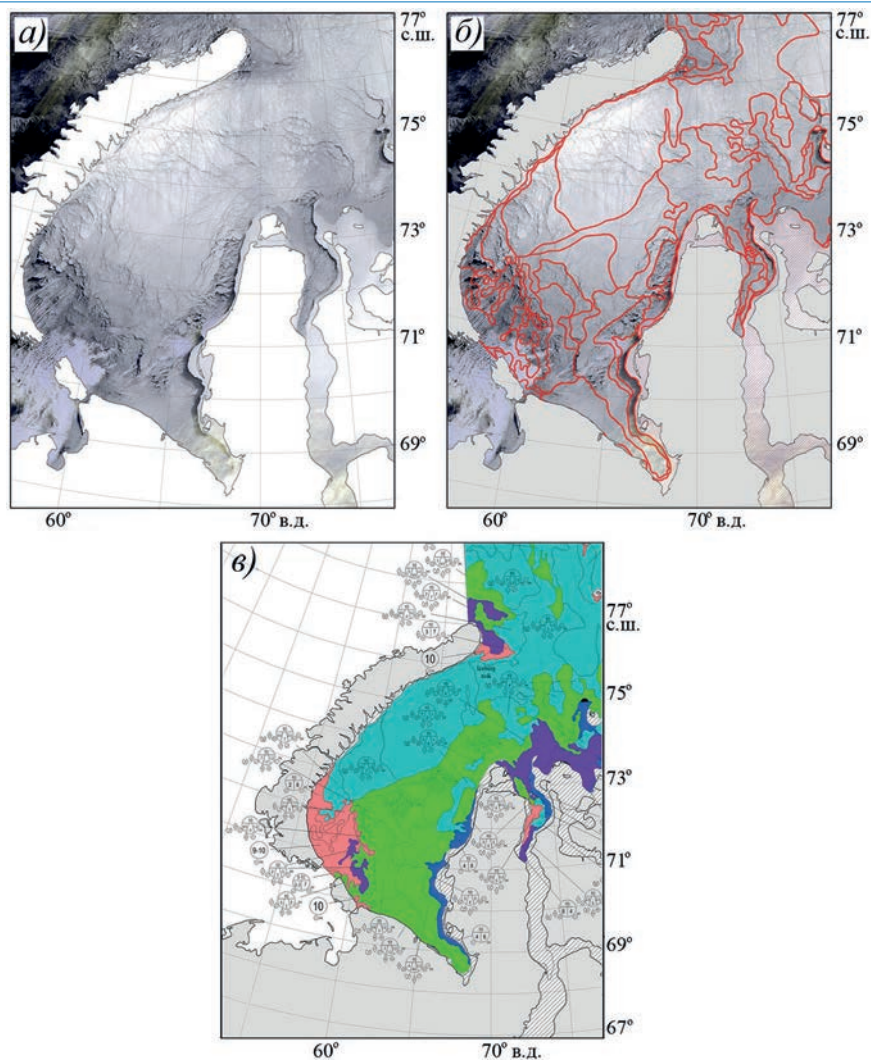


Рис. 1. Процесс создания ледовой карты:

а) исходное спутниковое изображение, полученное 15 апреля 2019 г. со спутника Suomi-NPP (VIIRS) в тепловом ИК-диапазоне; б) спутниковое изображение с нанесенными границами однородных ледовых зон; в) ледовая карта, отражающая возрастной состав ледяного покрова в юго-западной части Карского моря в период с 14 по 16 апреля 2019 г.

Fig. 1. The process of sea ice charting:

а) thermal infrared satellite image obtained on April 15, 2019 from Suomi-NPP (VIIRS); б) The image with delineated homogeneous ice zones; в) the chart of ice age composition in the south-western Kara Sea on April 14–16, 2019

дистанционного зондирования морского льда и механизмы влияния перечисленных факторов на отображение льда на спутниковых изображениях изложены в [12].

В случаях возникновения неоднозначностей при определении возраста льда, что в повседневной практике часто имеет место, эксперт руководствуется знанием общих закономерностей формирования и развития ледяного покрова в пределах

анализируемой акватории (иными словами, знанием ледового режима), а также представлением об особенностях развития ледяного покрова в текущем сезоне. Оценить возраст льда помогает также информация о погодных условиях, в частности сумме градусо-дней мороза, с момента осеннего ледообразования.

Для того чтобы подтвердить или опровергнуть свое предположение, ледовый эксперт обращается к данным натурных наблюдений, в том числе данным из диспетчерских сообщений судов. В случае если предположение было неверно, эксперт корректирует результат своей работы с учетом имеющихся данных. Именно поэтому ледовая информация, оперативно поступающая с судов на адрес ААНИИ, чрезвычайно важна для ледовых аналитиков. И чем гуще сеть натурных наблюдений, чем более равномерно она распределена по площади анализируемой акватории, тем результат экспертного анализа спутниковых изображений будет точнее и качественнее.

В настоящее время такую распределенную сеть натурных гидрометеорологических наблюдений, в том числе ледовых, формируют новые суда усиленного ледового класса, количество которых с каждым годом растет.

Визуальные судовые наблюдения за ледовой обстановкой

Большинство судов, работающих в морях Российской Арктики, ежедневно передают свои диспетчерские сообщения на адрес ААНИИ. Эти сообщения содержат в себе стандартные навигационные данные, такие как название и идентификационный номер судна, его географические координаты, курс, скорость и др., а также данные метеорологических и ледовых наблюдений в точке, где находилось судно на момент составления сообщения. Как правило, диспетчерские сообщения передаются один или два раза в сутки. Полный список параметров и порядок передачи диспетчерских сообщений регламентированы Правилами плавания в акватории СМП [13].

Наблюдения за состоянием ледяного покрова на судне производятся вахтенным штурманом визуально с ходового мостика. Оцениваются следующие параметры: общая сплоченность льда по десятибальной шкале, возраст льда с указанием частной сплоченности, наслоенность льда, торосистость, наличие и интенсивность сжатий во льду, разрушенность ледяного покрова. Также в состав диспетчерских сообщений включается информация о наблюдаемых ледовых явлениях — интенсивный дрейф, ледовая река и др. Визуальные ледовые наблюдения рекомендуется выполнять в соответствии с Руководящими документами Росгидромета [14] и методическим пособием, составленным ведущими специалистами ААНИИ [15].

Возраст льда, как относительный показатель толщины, определяется по характерным внешним признакам различных возрастных градаций. К таким внешним признакам относятся: цвет и тон льда, количество и характер распределения снега на его поверхности, количество гряд торосов, их высота и форма, характер взаимодействия льда с корпусом судна (например, характер распространения трещин во льду при прохождении судна) и др. Толщина также может оцениваться по боковым сколам льдин, выворачиваемых вдоль борта, при их визуальном сопоставлении с элементами конструкции судна на нижней палубе, горизонтальные размеры которых известны (леер, кнехт и др.).

Ледовый наблюдатель фиксирует параметры ледовой обстановки в районе плавания, ограниченном секторами, показанными на рис. 2, размер которых может сокращаться в зависимости от условий метеорологической дальности видимости.

Как уже упоминалось выше, существенное смягчение ледовых условий в Арктике, а также строительство и ввод в эксплуатацию современных судов усиленного ледового класса Arc7 в настоящее время позволяют постепенно переходить на круглогодичный режим навигации во всех арктических морях России. В частности, возможность круглого-

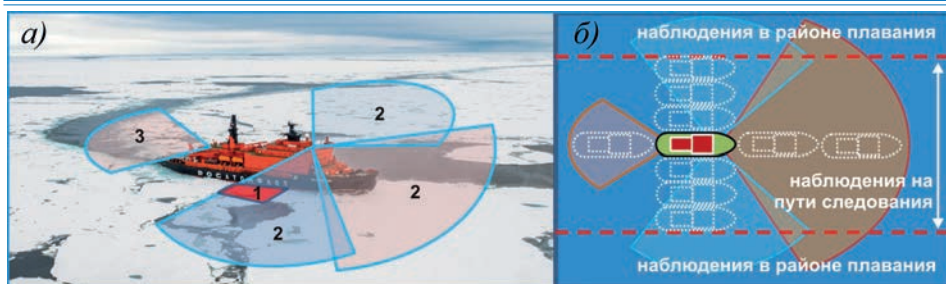


Рис. 2. Схема проведения ледовых наблюдений:

а) схема секторов и площадок ледовых наблюдений: 1 — площадка оценки толщины льда по боковым сколам выворачиваемых льдин, 2 — секторы обзорных наблюдений состояния ледяного покрова, 3 — сектор оценки сжатия; б) вид сверху

Fig. 2. The scheme of shipboard ice observations:

а) sectors and areas of ice observations: 1 — the area for estimating the thickness of ice floes turning up under the pressure of the ship's hull, 2 — the sectors for overview observations of sea ice conditions, 3 — the sector for estimating compression in ice; б) top view

дичной навигации в Восточно-Сибирском море была показана в 2018 г. специалистами Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова [16].

С точки зрения специалиста ледовой службы, занимающегося подготовкой информационно-продукции для гидрометеорологического обеспечения, рост судоходного трафика означает, что в его распоряжении появляется все большее количество натурных наблюдений за ледовой обстановкой в районе судоходных трасс, которые могут быть включены в анализ при составлении, в частности, ледовых карт. Как уже было сказано, наличие достоверных натурных данных помогает более успешно дешифровать возраст льда на спутниковых изображениях, что, как ожидается, должно способствовать повышению точности результирующих ледовых карт как элемента гидрометеорологического обеспечения.

Однако, как показывает практика, данные, поступающие с судов, далеко не всегда отвечают требованиям качества. Для того чтобы в условиях плавания правильно определять возраст и другие параметры ледяного покрова, наблюдателю необходим большой опыт ведения ледовых наблюдений под наставничеством старшего высококвалифицированного специалиста. Как правило, у членов экипажей коммерческих судов такой опыт минимален или отсутствует. Проблема усугубляется тем, что зачастую наблюдения в Арктике приходится выполнять в условиях плохой видимости — тумана, морозной дымки, полярной ночи.

Так, на рис. 3 изображены маршруты газозовов «Кристоф де Маржери» и «Николай Евгенов» в море Лаптевых и Восточно-Сибирском море при их следовании транзитным рейсом с запада на восток через акваторию СМП в первой половине января 2021 г. Оба судна имеют ледовый класс Arc7, что позволило им совершить этот сверхпоздний рейс. На показанном участке маршруты судов полностью совпадали с той лишь разницей, что «Кристоф де Маржери» проследовал его полутора сутками ранее (12.01.2021), чем «Николай Евгенов» (13–14.01.2021).

Анализ спутниковых изображений показал, что в период с 12 по 14 января 2021 г. в рассматриваемом регионе значительного дрейфа льда не наблюдалось. Это позволяет заключить, что оба судна следовали друг за другом через один и тот же лед и существенной разницы в значениях толщины, передаваемых этими судами, быть не должно. Однако из рис. 4 видно, что в целом по всему маршруту «Николай

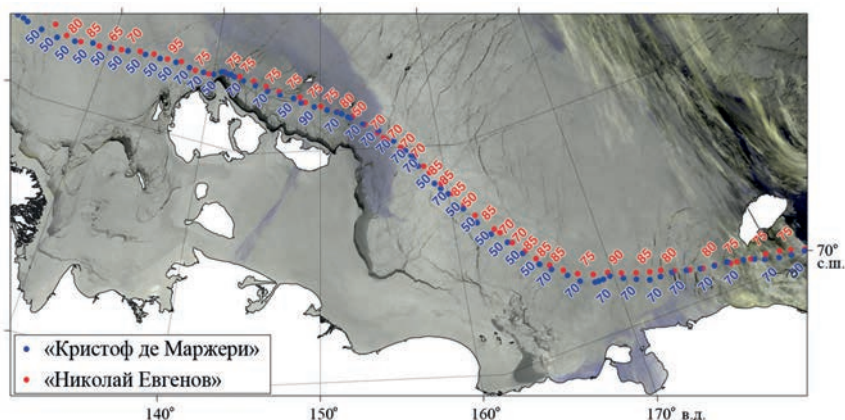


Рис. 3. Маршруты газовозов «Кристоф де Маржери» и «Николай Евгенов» в море Лаптевых и Восточно-Сибирском море при их следовании через акваторию СМП в январе 2021 г.

Числами вдоль маршрутов показаны значения толщины льда из диспетчерских сообщений судов. Маршруты наложены на спутниковое изображение, полученное 12 января 2021 г. со спутника Suomi-NPP (VIIRS) в тепловом ИК-диапазоне

Fig. 3. The routes of LNG/Cs “Christophe de Margerie” and “Nikolay Yevgenov” in the Laptev and East Siberian seas during their transit voyage through the Northern Sea Route in January 2021.

The numbers along the tracks indicate the values of sea ice thickness from the LNG/Cs ice reports. The routes are laid on a thermal infrared image obtained on January 12, 2021 from Suomi-NPP (VIIRS)

Евгенов» передавал большие по сравнению с «Кристофом де Маржери» значения толщины, при этом на отдельных участках разница достигала 35 см.

Возрастные градации льда, указываемые на картах ледовой обстановки, подразумевают под собой определенные интервалы толщины льда (см. Номенклатуру ВМО по морскому льду [9]). Так, лед толщиной от 30 до 70 см относится к градации «однолетний тонкий лед», от 70 до 120 см — к градации «однолетний средний лед», свыше 120 см — «однолетний толстый лед» и др. Если значения толщины льда, переданные разными судами в одной и той же географической точке, попадают в одну и ту же возрастную градацию, то различия в показаниях наблюдателей не являются столь критичными, в отличие от обратного случая, когда значения толщины льда попадают в разные возрастные



Рис. 4. Оценка толщины льда на пути следования газовозов «Кристоф де Маржери» и «Николай Евгенов» по данным диспетчерских сообщений судов

Fig. 4. The values of sea ice thickness on the routes of LNG/Cs “Christophe de Margerie” and “Nikolay Yevgenov”, according to their ice reports

градации. Как видно из рис. 4, такие ситуации на маршруте газозовов встречались повсеместно, особенно на отрезке пути к западу от меридиана 140° в. д. и в районе между меридианами 160° и 173° в. д., где «Николай Евгенов» передавал толщины однолетнего среднего льда, а «Кристоф де Маржери» — однолетнего тонкого.

Подобные разногласия между наблюдениями приводят к тому, что, несмотря на чрезвычайную ценность натуральных наблюдений, степень доверия к ним у ледовых аналитиков, работающих в системе гидрометеорологического обеспечения, падает.

Становится очевидным, что для снижения субъективности визуальных оценок ледовых условий в районе плавания наблюдения за ледовой обстановкой должны быть стандартизированы. Стандартизация измерений может быть достигнута через разработку и внедрение инструментальных технологий сбора данных.

Судовой телевизионный комплекс СТК и автоматизированный судовой модуль СТМК

С целью обеспечения высоко детализированной оценки ледовых условий сотрудниками ААНИИ с 2000-х гг. прорабатывались различные варианты инструментализации процесса судовых наблюдений. В результате был разработан судовой телевизионный комплекс СТК, состоящий из основного видеорегистратора выворотов льда у борта судна с наложенной измерительной сеткой и системы периферических камер, регистрирующих обстановку вокруг судна. Данный комплекс закрепляется на элементах конструкции судна и производит съемку контролируемых зон с заданной частотой, одновременно осуществляя автоматическую пространственно-временную привязку снимков, накапливаемых на специальных носителях. Обработка накапливаемых данных производится выборочно ледовым специалистом на судне, а полная обработка осуществляется в отложенном режиме по завершении рейса (рис. 5).

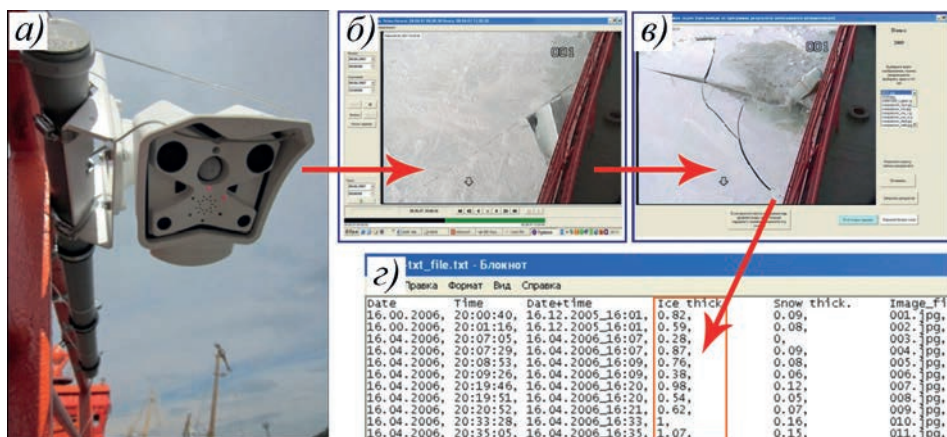


Рис. 5. Схема избирательной оценки толщины льда, выполняемой ледовым наблюдателем с помощью блока толщиномера СТК.

а) внешний вид основного видеорегистратора СТК; б) интерфейс специализированного программного обеспечения (ПО) для отбора изображений выворотов льда; в) интерфейс специализированного ПО для определения толщины льда; г) таблица выходных данных

Fig. 5. The principle of selective ice thickness assessment provided by an ice observer with the use of an STC module.

а) the view of STC video recorder; б) Specialized software interface for selecting the images of turned-up ice floes; в) specialized software interface for determining the thickness of ice; г) the table of output data

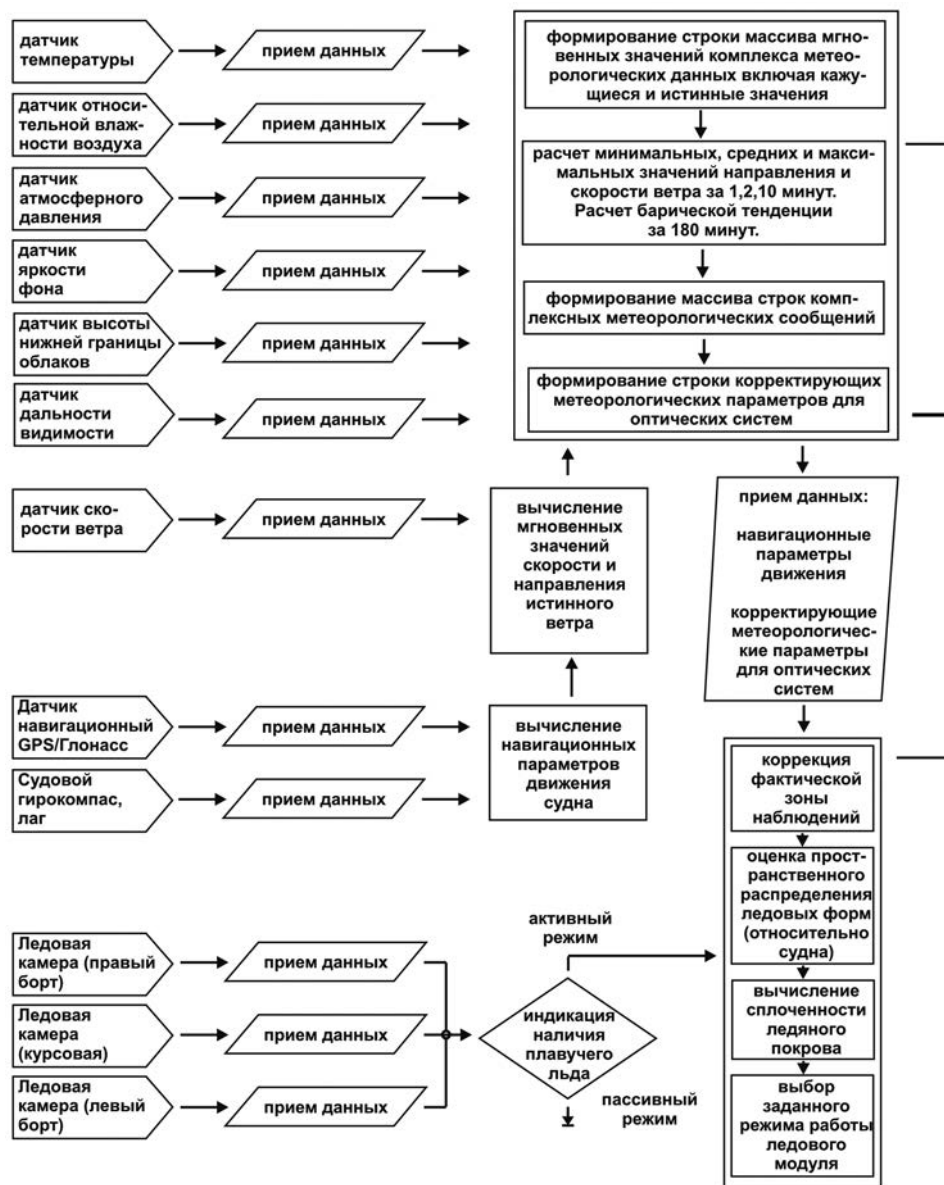
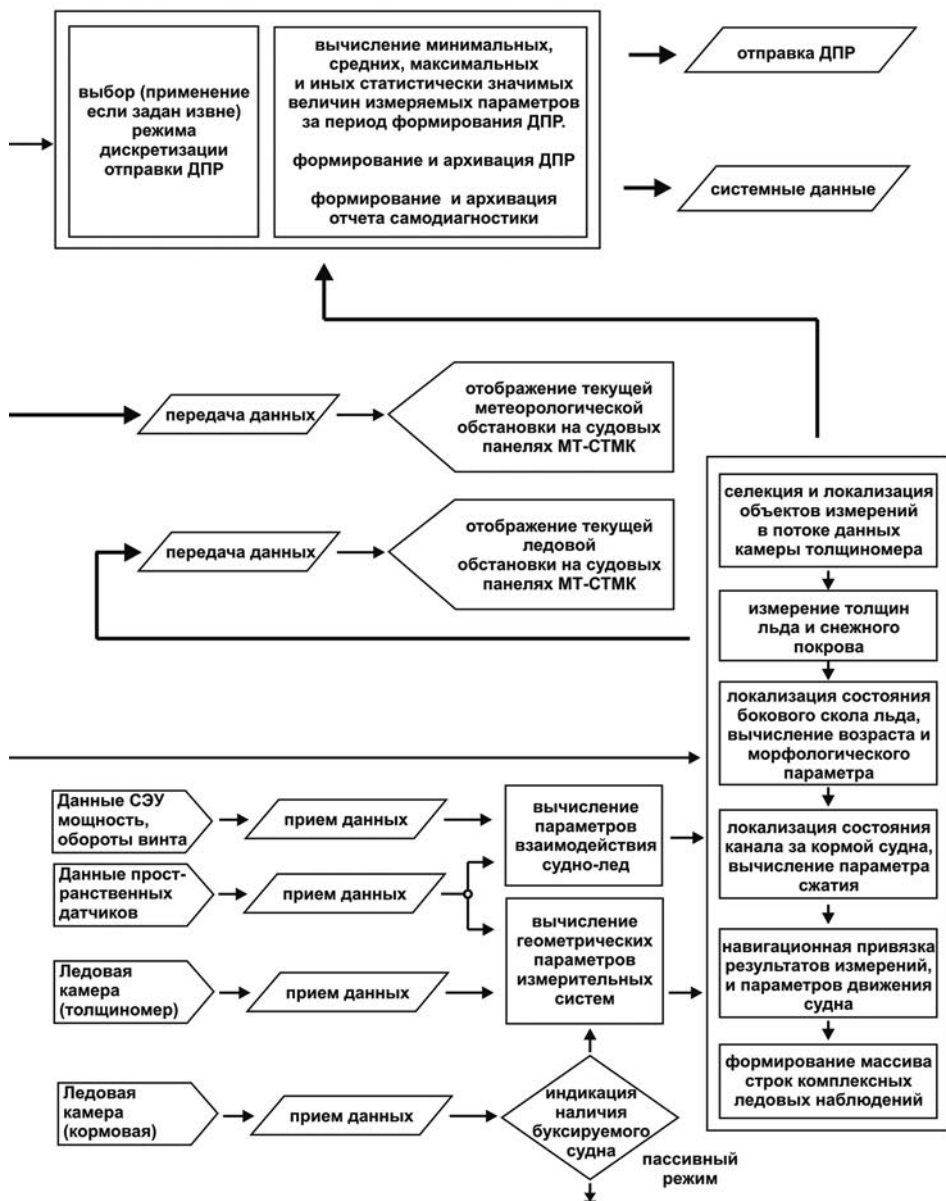


Рис. 6. Принципиальная схема

Fig. 6. Schematic diagram



модуля СТМК
of the STMC module

Главными преимуществами использования толщиномера СТК являются непрерывность и высокая детализация наблюдений. В отличие от данных из диспетчерских сообщений, передаваемых один или два раза в сутки и описывающих ледовые условия в одной географической точке, СТК позволяет производить измерения непрерывно в автономном режиме на протяжении всего рейса. Кроме того, в ходе экспедиционных рейсов ААНИИ применение СТК позволило устранить фактор субъективности при оценке толщины ледяного покрова. Сравнение фактических значений толщины льда и их измерений с помощью СТК показало, что различия не превышают 3,8 %, тогда как погрешность визуальных наблюдений при использовании рейки с 10-сантиметровыми делениями составляет 10 см (то есть размер деления) и может быть существенно больше, если рейка при наблюдениях не используется [5, 17].

Основными недостатками СТК являются его низкая оперативность и невозможность передачи результатов регистрации в ситуационный центр ААНИИ ввиду их критически большого объема.

Благодаря накопленному за семнадцать лет архиву данных и приобретенному опыту наблюдений, выполненных с помощью различных вариаций комплекса СТК, стало возможным решение задачи полной автоматизации процесса проведения измерений и получения оперативных результатов без участия ледового наблюдателя, а также был решен вопрос оперативной передачи результатов в ситуационный центр посредством судовых систем связи, имеющих скромную пропускную способность.

В 2018 г. был разработан проект автоматизированного судового модуля СТМК, позволяющего, помимо толщины льда, также получать данные о сплоченности ледяного покрова, его возрасте, наличии и степени сжатия льда, сопутствующих метеорологических условиях, а также фактической ледопроеходимости судна-носителя. К 2020 г. была разработана модель комплекса и проведены испытания ключевых элементов системы в реальных условиях применения.

Судовой автоматизированный модуль СТМК сочетает в себе телевизионные системы регистрации ледовой обстановки в районе плавания, блок метеостанции, блок сопряжения с судовыми навигационными системами, сервер обработки данных, устройства отображения текущей информации на мостике судна, а также блок оперативной передачи данных и удаленного контроля (рис. 6).

Фактически СТМК заменяет собой 85 % функций ледового наблюдателя на борту судна и не требует наличия оператора, выполняя весь комплекс судовых наблюдений автоматически. Применительно к использованию на коммерческих судах, модуль СТМК позволит снять дополнительную нагрузку с вахтенного штурмана.

Будучи пригодным для самостоятельной работы на большинстве судов ледового класса, модуль СТМК позволит по мере внедрения создать распределенную сеть оперативного сбора ключевых натурных данных о фактическом состоянии ледяного покрова и сопутствующих параметрах на всем протяжении СМП.

Взаимодействуя с единым центром контроля и управления, планируемая сеть обеспечит непрерывный оперативный поток реперных данных для уточнения результатов работы ледовой информационной системы.

Сопоставление данных СТК с результатами экспертного анализа спутниковых изображений

Для того чтобы наглядно проиллюстрировать возможности внедрения новой технологии с использованием СТК (в модернизированной версии — СТМК) в работу системы оперативного гидрометеорологического обеспечения, обратимся к ледовым картам ААНИИ и сопоставим их с данными СТК, которые были получены специалистами института в ходе двух высокоширотных арктических экспедиций.

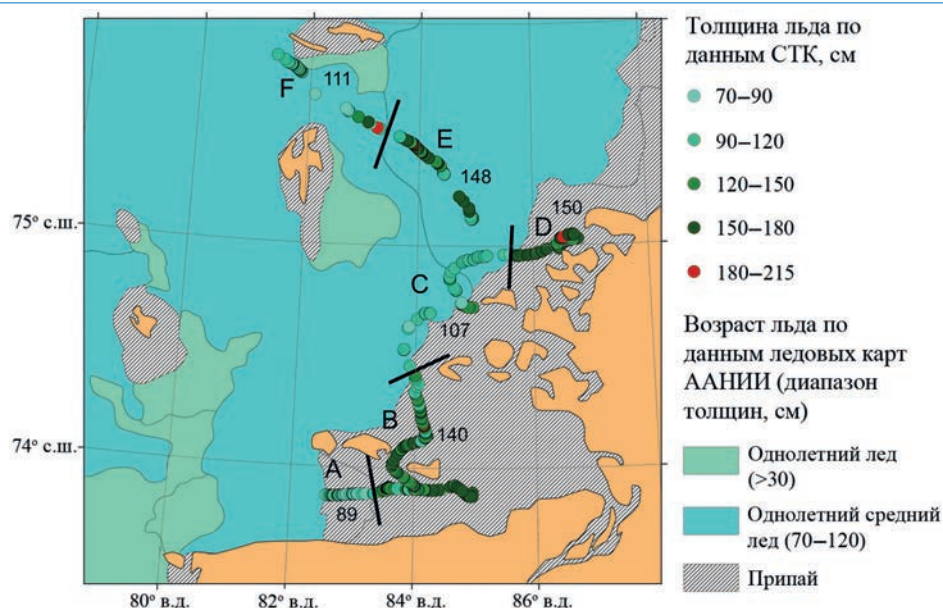


Рис. 7. Сопоставление данных СТК с результатом анализа спутниковых изображений, выполненного ледовым экспертом ААНИИ.

Спутниковые данные собраны за период с 16 по 18 мая 2021 г. Данные СТК получены специалистами ААНИИ в ходе экспедиционного рейса в Карском море в период с 10 по 18 мая 2021 г.

Fig. 7. Comparison of STC data with an AARI ice chart.

Satellite data was collected for the period of May 16–18, 2021. The data from STC was collected by AARI ice specialists in the Kara Sea on May 10–18, 2021

На рис. 7 приведен фрагмент ледовой карты Карского моря, составленной экспертом ААНИИ на основе анализа спутниковых изображений, собранных за период с 16 по 18 мая 2021 г. На карту нанесены точки, в которых в ходе экспедиционных работ с использованием СТК были собраны данные о толщине ледяного покрова. Работы проводились на грузовом судне типа Arc7 в районе Пясинского залива и островов Известий ЦИК в период с 10 по 18 мая 2021 г., при этом до 15 мая работы велись в припайном льду. По окончании рейса полученные данные были обработаны и пересчитаны в фактические значения толщины.

Далее весь маршрут экспедиционных работ был разделен на участки, попадающие в границы различных ледовых зон, выделенных ранее экспертом на ледовой карте. Характеристики, присвоенные каждой из ледовых зон, были сопоставлены со значением толщины от СТК, полученным путем осреднения всех измерений, попавших в соответствующую зону.

Таким образом, маршрут экспедиции был разделен на шесть однородных ледовых зон:

- в зоне А на ледовой карте отмечен припай, состоящий на 30 % из однолетнего толстого льда (>120 см) и на 70 % из однолетнего среднего льда (70–120 см). Средняя толщина льда в зоне, согласно данным СТК, равна 89 см, что хорошо согласуется с результатом экспертного дешифрирования спутниковых изображений;

- в зоне В ледовый эксперт отметил припай однолетнего толстого льда. По данным СТК, средняя толщина припая была равна 140 см, что также согласуется с оценкой эксперта;

– в зоне С на карте отмечен дрейфующий лед с преобладанием однолетнего среднего льда и включением однолетнего толстого в количестве 20–30 %. Средняя толщина льда по данным СТК составляла 107 см. Разногласий с результатом экспертного анализа не отмечено;

– в зоне D на карте отмечен припай однолетнего толстого льда. По данным СТК, его средняя толщина составляла 150 см, что совпадает с оценкой ледового эксперта;

– в зоне E на карте эксперт отметил преобладание однолетнего среднего льда с включением однолетнего толстого до 30 %. Согласно данным СТК, в зоне преобладал однолетний толстый лед со средней толщиной около 148 см. В данном районе имеет место недооценка толщины льда экспертом минимум на 30 см. Если бы ледовая карта составлялась с учетом данных СТК, поступающих на адрес ледовой службы ААНИИ в оперативном режиме, то обнаруженной недооценки можно было бы избежать;

– в зоне F ледовый эксперт отметил преобладание однолетнего среднего льда с включением однолетнего толстого в количестве 20–30 %. Данные СТК это подтверждают, средняя толщина льда в зоне была около 111 см.

Для того чтобы более полно проиллюстрировать потенциал оперативно поступающих данных от СТК, необходимо рассмотреть больше примеров их сопоставления с ледовыми картами, содержащими информацию о возрастном составе ледяного покрова. Согласно методике ледового картирования ААНИИ [1], возраст льда может быть определен по спутниковым изображениям только в течение зимнего сезона — с октября по май. Соответственно, данные СТК для сопоставления также должны быть получены в этот период года. Однако большая часть экспедиций в Арктике проводится в летний период, когда отмечается интенсивное таяние ледяного покрова. По этой причине на сегодняшний день «зимних» данных СТК в распоряжении ААНИИ крайне мало.

В такой ситуации имеет смысл проанализировать данные СТК наиболее ранних июньских экспедиций в паре с наиболее поздними майскими картами ледовой обстановки, сделав при этом поправку на дрейф льда в период времени, разделяющий эти два вида данных.

На рис. 8 данные СТК, собранные в ходе полусуточного рейса атомного ледокола «50 лет Победы» в период с 16 по 20 июня 2018 г., сопоставлены с результатом визуального анализа спутниковых изображений, собранных за период с 27 по 29 мая того же года. Стрелками показаны направление и величина дрейфа льда в период с 29 мая по 17 июня 2018 г., которые были получены по результатам анализа последовательных радиолокационных изображений спутников Sentinel-1. Изображения были взяты с Интернет-ресурса Датского технического университета [18]. Уменьшением толщины льда за счет таяния в данный период времени можно пренебречь, так как процессы таяния в приполюсном районе Арктики в начале-середине июня еще не так интенсивны.

При сравнении ледовой карты с данными СТК были получены следующие результаты:

– в зоне А на карте должен преобладать однолетний тонкий лед (30–70 см) с редкими включениями однолетнего среднего (70–120 см). Согласно данным СТК, толщина льда составляла около 68 см, что хорошо согласуется с ледовой картой;

– в зоне В на ледовой карте должен преобладать однолетний средний лед с редкими включениями однолетнего толстого (>120 см). По судовому треку видим, что включения однолетнего толстого льда в зоне присутствуют. Однако преобладает не

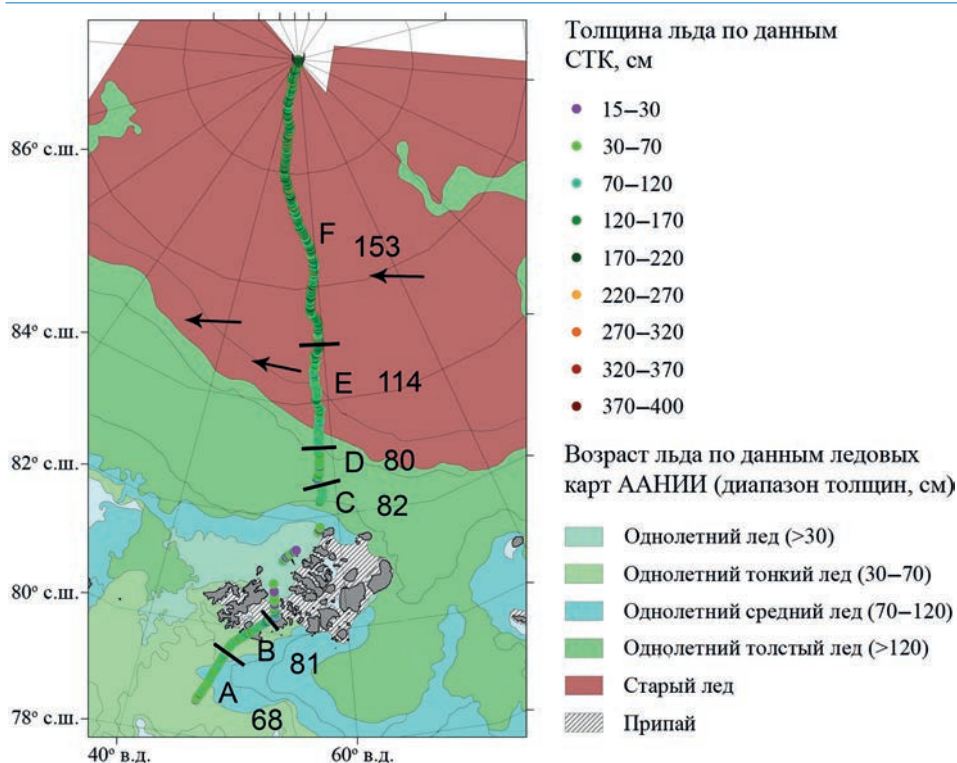


Рис. 8. Сопоставление данных СТК с результатом анализа спутниковых изображений, выполненного ледовыми экспертами ААНИИ.

Спутниковые данные собраны за период с 27 по 29 мая. Данные СТК получены в ходе полюсного рейса атомного ледокола «50 лет Победы» в период с 16 по 20 мая 2018 г. Черной стрелкой указаны величина и направление дрейфа в период с конца мая по середину июня 2018 г.

Fig. 8. Comparison of STC data with an AARI ice chart.

Satellite data was collected for the period of May 27–29, 2018. The data from STC was collected during the nuclear icebreaker “50 Let Pobedy” voyage to the North Pole on June 16–20, 2018

средний лед, а, скорее, смесь однолетнего среднего и тонкого льда, где их приблизительно поровну. Средняя толщина льда в зоне В, согласно данным СТК, была равна 81 см;

– в зоне С, согласно ледовой карте, однолетнего среднего и тонкого льда должно быть примерно поровну. Данные СТК подтверждают правильность этого предположения, показывая эти виды льда со средней толщиной 82 см;

– согласно ледовой карте, в зоне D должно быть значительное преобладание однолетнего толстого льда. Однако данные СТК показывают однолетний тонкий и средний лед с редкими включениями однолетнего толстого. Средняя толщина льда в зоне D, согласно данным СТК, составляла 80 см против предполагаемых >120 см. Таким образом, в зоне D отмечается большое расхождение — 40 см минимум — между результатом экспертного анализа и измерениями СТК;

– в зоне E находится массив двухлетнего льда. Согласно Номенклатуре ВМО по морскому льду, данная возрастная градация не имеет четко определенных пределов толщины. Использование инструмента СТК позволяет получить ее фактические значения. В зоне E толщина двухлетнего льда была около 114 см;

– в зоне F находится массив многолетнего льда. Аналогично двухлетнему льду, старый лед не имеет четко определенных значений толщины. Согласно данным СТК, средняя толщина старого льда в массиве составляла около 153 см.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В данной работе был освещен вопрос необходимости получения оперативных инструментальных данных о толщине ледяного покрова для включения их в число анализируемой информации при создании более качественных ледовых информационных продуктов, являющихся составной частью оперативного гидрометеорологического обеспечения морской деятельности в акватории СМП и других замерзающих морях. Необходимость получения таких данных была показана на примере ледовых карт, составляемых специалистами ледовой информационной системы ААНИИ.

Было показано, что ледовые наблюдения, выполняемые на современных судах, не всегда обладают желаемой степенью надежности. Так, при сравнении оценок толщины льда, полученных от газозовов «Кристоф де Маржери» и «Николай Евгенов» в январе 2021 г. при их следовании друг за другом через акваторию моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря, выяснилось, что расхождения в их показаниях достигали 35 см, причем значения толщины попадали в разные возрастные градации льда, что для ледового эксперта существенно.

Подобные разногласия, нередко встречающиеся в оперативной практике, ставят вопрос о необходимости стандартизации измерений ледовых параметров, в частности толщины льда, на пути плавания судов. Предполагается, что технология сбора данных о толщине ледяного покрова с применением автоматизированного комплекса СТМК, разработанного в ААНИИ в 2018 г., позволит стандартизировать измерения и существенно повысить их точность.

На двух примерах сопоставления данных СТК (более ранняя версия СТМК) с ледовыми картами ААНИИ было проиллюстрировано, что поступление информации от СТК в оперативном режиме могло бы повысить точность экспертного анализа спутниковых изображений. Несмотря на то, что экспертные оценки в большинстве своем были корректными, все же отмечались районы, удаленные от берега и от ближайших наблюдательных пунктов, где ошибка дешифрирования достигала минимум 30–40 см. Реперные данные в этих районах отсутствуют на протяжении всего года, поэтому эксперт при составлении ледовой карты, вероятно, помимо прямых дешифровочных признаков льда, ориентировался на собственные знания о ледовом режиме акватории и о том, как развивались метеорологические и ледовые условия в данном районе с момента осеннего ледообразования.

Размещение автоматизированных модулей СТМК на судах обеспечит специалистов ледовой информационной службы необходимыми данными о фактической толщине и других параметрах ледяного покрова непосредственно в районах судоходных трасс, где качество предоставляемой ледовой информационной продукции особенно важно. Также немаловажным является получение информации о фактической ледопроеходимости судов-носителей СТМК относительно текущих условий, что позволит более точно планировать морские операции с участием этих судов.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Ледовые карты широко используются во всем мире для решения широкого круга как практических, так и научных задач.

С практической точки зрения, на которой в данной работе сконцентрировано больше внимания, ледовые карты являются базовым элементом оперативного гидрометеорологического обеспечения судоходства и других видов морской деятельности. Слово «базовым» означает, что ледовые карты могут выступать не только как конечный информационный продукт, но и как входная информация для создания продуктов более высоких уровней: краткосрочных и долгосрочных ледовых прогнозов, рекомендаций для тактического и стратегического планирования морских операций. С учетом всей перечисленной информационной продукции решаются такие задачи, как: выбор оптимального маршрута плавания судна, заблаговременная разработка сценария транзитного плавания в акватории СМП, выбор подходящего полигона для работ на льду, определение дат открытия и закрытия сезона навигации и др. Очевидно, что точность ледовых карт чрезвычайно важна, поскольку ошибки, закладываемые на этапе ее составления, автоматически влекут за собой ошибки на всех последующих уровнях гидрометеорологического обеспечения, которые могут быть чреваты большими экономическими потерями для потребителя. Размещение автоматизированных модулей СТМК на судах позволит специалистам ледовой информационной службы получать данные, необходимые для оперативного уточнения результатов своей работы и результирующих карт.

С научной точки зрения ледовые карты довольно часто используются исследователями, занимающимися разработкой автоматизированных алгоритмов определения характеристик ледяного покрова по данным спутниковой съемки [19–25]. Ледовые карты используются на этапе валидации алгоритмов, выступая в качестве эталона. Кроме того, многолетний архив ледовых карт анализируется авторами в различных климатических исследованиях [26–31]. Результат этих исследований зависит, в том числе, от качества ледовых карт, предоставляемых той или иной ледовой информационной службой.

Как видно, в высоком качестве ледовой информационной продукции заинтересован очень широкий круг потребителей.

Регулярность и широкий пространственный охват сети натурных наблюдений напрямую способствуют повышению точности ледовых карт и всей системы оперативного гидрометеорологического обеспечения как единого целого.

В настоящее время растущее число судов, способных круглый год курсировать вдоль трассы СМП и регулярно предоставлять оперативные данные о метеорологической и ледовой обстановке, является единственной доступной по экономическим причинам инфраструктурой, пригодной для организации распределенной сети оперативного мониторинга ледовой и метеорологической обстановки на трассе СМП и в прилегающих районах. Установка автоматизированных модулей СТМК на судах позволит получать надежные и достоверные данные.

Возвращаясь к вопросу о разработке автоматизированных алгоритмов определения характеристик льда по данным спутниковой съемки, затронутому чуть ранее, уместно будет добавить в заключение, что ледовые службы мира в настоящее время очень заинтересованы во внедрении автоматизированных методик в свою работу. В частности, большой интерес вызывает решение проблемы автоматического определения возрастных характеристик и толщины ледяного покрова. Важным этапом разработки любого алгоритма является его валидация, для которой, в идеале, необходимо большое количество натурных подспутниковых измерений (именно по

причине дефицита таких данных исследователи пользуются ледовыми картами для валидации). С этой точки зрения развитие сети натурных наблюдений СТМК приобретает еще большую актуальность.

Конфликт интересов. Авторы статьи не имеют конфликта интересов.

Финансирование. Работа выполнена в рамках НИТР НИУ Росгидромета на 2021–2024 гг. по теме 5.1.2. Развитие существующих и разработка новых методов и технологий долгосрочного (месячного и сезонного) прогнозирования элементов ледово-гидрологического режима арктических морей, низовьев и устьевых областей рек в условиях климатических изменений. Анализ спутниковых данных выполнялся в рамках темы «Мониторинг» гос. регистрация № 122042500031-8 (Е.В. Афанасьева, Т.А. Алексеева).

Благодарности. В работе использовались ледовые карты, составленные в Центре ледовой и гидрометеорологической информации (ЦЛГМИ) ААНИИ, и спутниковые данные, полученные с помощью спутниковой наземной станции Российской научной экспедиции на архипелаге Шпицберген (РАЭ-Ш) ААНИИ.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Funding. The analysis of satellite data was carried out within the framework of the topic “Monitoring”, state registration no. 122042500031-8 (E.V. Afanasyeva, T.A. Alekseeva).

Acknowledgements. The authors used ice charts prepared by ice experts from the Center of Ice and Hydrometeorological Information, AARI, and satellite imagery received by ground station of the Russian Scientific Expedition on Svalbard, AARI.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасьева Е.В., Алексеева Т.А., Соколова Ю.В., Демчев Д.М., Чуфарова М.С., Быченков Ю.Д., Девятаев О.С. Методика составления ледовых карт ААНИИ // Российская Арктика. 2019. № 7. С. 5–20. doi: 10.24411/2658-4255-2019-10071.
2. Cryo. Automatic Sea Ice Analysis. URL: <https://cryo.met.no/en/automatic-sea-ice-analysis> (дата обращения 05.05.2022).
3. Cheng A., Casati B., Tivy A., Zagon T., Lemieux J.-F., Tremblay L.B. Accuracy and inter-analyst agreement of visually estimated sea ice concentrations in Canadian Ice Service ice charts using single-polarization RADARSAT-2 // The Cryosphere. 2020. № 14. P. 1289–1310. doi: 10.5194/tc-14-1289-2020.
4. Патент № 70983 Российская Федерация, МПК G01C 13/00 (2006.01), G01W 1/00 (2006.01). Устройство для измерения толщины льдин с борта судна / Клейн А.Э., Третьяков В.Ю., Фролов С.В.; заявитель и патентообладатель ГУ ААНИИ — № 2007142411; заявл.: 16.11.2007; опубл. 20.02.2008, Бюл. № 5.
5. Фролов С.В., Клейн А.Э., Третьяков В.Ю. Результаты использования цифрового телевизионного комплекса для измерения толщины льда в Арктическом бассейне в 2004–2005 гг. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2007. № 75. С. 123–127.
6. Сероветников С.С., Фролов С.В., Клейн А.Э. Судовой телевизионный комплекс — реализация автоматизированной системы натурных измерений толщины морского льда // Российская Арктика. 2018. № 2. С. 41–55. doi: 10.24411/2658-4255-2018-00017.
7. Патент № 2767293 Российская Федерация, МПК G01B 11/06 (2006.01), G01B 11/06 (2022.02). Судовой измеритель толщины льда / Сероветников С.С., Ковчин И.М.; заявитель и патентообладатель ООО «НПО Аквастандарт». — № 2021114064; заявл. 18.05.2021; опубл. 17.03.2022, Бюл. № 8.
8. Sea-ice information services in the world. WMO № 574. Geneva, 2019.

9. Sea ice nomenclature. WMO № 259, V. 1 — Terminology and codes. Geneva, 2017.
10. Спутниковые методы определения характеристик ледяного покрова морей / Под ред. Смирнова В. Г. СПб.: ААНИИ, 2011. 240 с.
11. Johannessen O.M., Sandven S., Dalen Ø., Kloster K., Lundhaug M., Hamre T., Melentyev V.V., Alexandrov V., Bogdanov A., Babich N.I. SAR Sea Ice Interpretation Guide. NERSC Technical Report № 227. Bergen: NERSC, 2006. 104 p.
12. Shokr M., Sinha N.K. Sea Ice: Physics and Remote Sensing. New Jersey: Wiley, 2015. 624 p.
13. Постановление Правительства РФ от 18 сентября 2020 г. № 1487 «Об утверждении Правил плавания в акватории Северного морского пути». URL: <https://base.garant.ru/74664152/> (дата обращения 16.05.2022)
14. Руководство по гидрометеорологическому обеспечению морской деятельности. РД 52.27.881-2019. М.: ФГБУ «Гидрометцентр России», 2019. 132 с.
15. Атлас ледяных образований / Под ред. В.М. Смоляницкого. СПб.: ААНИИ, 2019. 232 с.
16. Шаронов А.Ю., Шматков В.А. Задачи гидрометеорологического обеспечения круглогодичной навигации в Восточно-Сибирском море // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2018. № 10 (1). С. 170–182. doi: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-170-182.
17. Фролов С.В., Третьяков В.Ю., Клейн А.Э., Алексеева Т.А. Новые данные о толщине льда и ее изменчивости в Арктическом бассейне в 2006–2009 годах // Лед и снег. 2011. № 3 (115). С. 99–104.
18. Sea Ice Denmark. URL: <http://seaice.dk/> (дата обращения 05.05.2022).
19. Similä M., Mäkyinen M., Cheng B., Rinne E. Multisensor data and thermodynamic sea-ice model based sea-ice thickness chart with application to the Kara Sea, Arctic Russia // Annals of Glaciology. 2013. № 54 (62). P. 241–252. doi:10.3189/2013AoG62A163.
20. Zakhvatkina N.Yu., Alexandrov V.Yu., Johannessen O.M., Sandven S., Frolov I.Ye. Classification of Sea Ice Types in ENVISAT Synthetic Aperture Radar Images // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2013. № 51 (5). P. 2587–2600. doi: 10.1109/TGRS.2012.2212445.
21. Zakhvatkina N.Yu., Bychkova I.A. Bayesian Classification of the Ice Cover of the Arctic Seas // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2015. № 51 (9). P. 883–888. doi: 10.1134/S0001433815090212.
22. Rinne E., Similä M. Utilisation of CryoSat-2 SAR altimeter in operational ice charting // The Cryosphere. 2016. № 10. P. 121–131. doi: 10.5194/tc-10-121-2016.
23. Mäkyinen M., Karvonen J. MODIS Sea Ice Thickness and Open Water–Sea Ice Charts over the Barents and Kara Seas for Development and Validation of Sea Ice Products from Microwave Sensor Data // Remote Sensing. 2017. № 9. 1324. doi:10.3390/rs9121324.
24. Заболотских Е.В., Хворостовский К.С., Балашова Е.А., Костылев А.И., Кудрявцев В.Н. О возможности идентификации крупномасштабных областей восторщенного льда в Арктике по данным скаттерометра ASCAT // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. № 17 (3). С. 165–177. doi: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-165-177.
25. Karvonen J., Rinne E., Sallila H., Uotila P., Mäkyinen M. Kara and Barents sea ice thickness estimation based on CryoSat-2 radar altimeter and Sentinel-1 dual-polarized synthetic aperture radar // The Cryosphere. 2022. № 16. P. 1821–1844. doi: 10.5194/tc-16-1821-2022.
26. Mahoney A.R., Barry R.G., Smolyanitsky V., Fetterer F. Observed sea ice extent in the Russian Arctic, 1933–2006 // Journal of Geophysical Research. 2008. №113. C11005. doi:10.1029/2008JC004830.
27. Думанская И.О. Ледовые условия морей европейской части России. М.; Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2014. 608 с.

28. Думанская И.О. Ледовые условия морей азиатской части России. М.; Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2017. 640 с.
29. Карклин В.П., Хотченков С.В., Юлин А.В., Смоляницкий В.М. Сезонные изменения возрастного состава льдов в северо-восточной части Карского моря в осенне-зимний период // Проблемы Арктики и Антарктики. 2016. № 4 (110). С. 41–50.
30. Карклин В.П., Хотченков С.В., Юлин А.В., Смоляницкий В.М. Формирование возрастного состава льда в юго-западной части Карского моря в осенне-зимний период // Проблемы Арктики и Антарктики. 2017. № 3 (113). С. 16–26. doi: 10.30758/0555-2648-2017-0-3-16-26.
31. Хотченков С.В. Формирование возрастного состава ледяного покрова в море Лаптевых // Проблемы Арктики и Антарктики. 2017. № 4 (114). С. 5–15. doi: 10.30758/0555-2648-2017-0-4-5-15.

REFERENCES

1. Afanas'eva E.V., Alekseeva T.A., Sokolova Iu.V., Demchev D.M., Chufarova M.S., Bychenkov Iu.D., Deviatayev O.S. AARI methodology for sea ice charts composition. *Rossiiskaia Arktika*. Russian Arctic. 2019, 7: 5–20. doi: 10.24411/2658-4255-2019-10071. [In Russian].
2. Cryo. Automatic Sea Ice Analysis. Available at: <https://cryo.met.no/en/automatic-sea-ice-analysis> (accessed 05.05.2022).
3. Cheng A., Casati B., Tivy A., Zagon T., Lemieux J.-F., Tremblay L.B. Accuracy and inter-analyst agreement of visually estimated sea ice concentrations in Canadian Ice Service ice charts using single-polarization RADARSAT-2. *The Cryosphere*. 2020, 14: 1289–1310. doi: 10.5194/tc-14-1289-2020.
4. Klein A.E., Tret'yakov V.Iu., Frolov S.V. *Ustroistvo dlia izmereniia tolshchiny l'din s borta sudna* (Instrument for measuring the thickness of ice floes from the ship's board). Patent RF, no. 70983, 2008. [In Russian].
5. Frolov S.V., Klein A.E., Tret'yakov V.Iu. Results of using a digital TV complex for ice thickness measurements in the Arctic Basin in 2004–2005. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of Arctic and Antarctic. 2007, 75: 123–127. [In Russian].
6. Serovetnikov S.S., Frolov S.V., Klein A.E. Ship-based television complex — the program for automatic sea ice thickness monitoring. *Rossiiskaia Arktika*. Russian Arctic. 2018, 2: 41–55. doi: 10.24411/2658-4255-2018-00017. [In Russian].
7. Serovetnikov S.S., Kovchin I.M. *Sudovoi izmeritel' tolshchiny l'da* (Ship-based ice thickness measurer). Patent RF, no. 2767293, 2022. [In Russian].
8. Sea-ice information services in the world. WMO № 574. Geneva, 2019.
9. Sea ice nomenclature. WMO № 259, V. 1 — Terminology and codes. Geneva, 2017.
10. *Sputnikovye metody opredeleniia kharakteristik ledianogo pokrova morei*. Satellite methods for determining sea ice cover characteristics. Ed. Smirnov V.G. St. Petersburg: Arctic and Antarctic Research Institute, 2011: 240 p. [In Russian].
11. Johannessen O.M., Sandven S., Dalen Ø., Kloster K., Lundhaug M., Hamre T., Melentyev V.V., Alexandrov V., Bogdanov A., Babich N.I. SAR Sea Ice Interpretation Guide. NERSC Technical Report № 227. Bergen: NERSC, 2006: 104 p.
12. Shokr M., Sinha N.K. *Sea Ice: Physics and Remote Sensing*. New Jersey: Wiley, 2015: 624 p.
13. *Postanovlenie Pravitel'stva RF 18.09.2020 N 1487 "Ob utverzhdenii Pravil plavaniia v akvatorii Severnogo morskogo puti"* (Decree of the Government of the Russian Federation no. 1487, September 18, 2020 "On approval of the Rules for navigation in the area of the Northern Sea Route"). Available at: <http://www.nsr.ru/files/fileslist/137-ru893-2020.pdf> (accessed 16.05.2022). [In Russian].
14. *Rukovodstvo po gidrometeorologicheskomu obespecheniiu morskoi deiatel'nosti*. Guidance for hydrometeorological support of maritime activities. Roshydromet Guidance document № 52.27.881-2019. Moscow: FGBU "Hydrometcenter of Russia", 2019: 132 p. [In Russian].

15. *Atlas ledianykh obrazovaniy*. Atlas of ice formations. Ed. Smolianitskii V. M. St. Petersburg: Arctic and Antarctic Research Institute, 2019: 232 p. [In Russian].
16. *Sharonov A.Iu., Shmatkov V.A.* The problem of hydrometeorological maintenance of year-round navigation in the East Siberian Sea. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. Bulletin of the Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping. 2018, 10 (1): 170–182. doi: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-170-182. [In Russian].
17. *Frolov S.V., Tret'akov V.Iu., Klein A.E., Alekseeva T.A.* New data on sea ice thickness and its variability in the Arctic Basin in 2006-2009. *Led i sneg*. Ice and snow. 2011, 3 (115): 99–104. [In Russian].
18. Sea Ice Denmark. Available at: <http://seaice.dk/> (accessed 05.05.2022).
19. *Similä M., Mäkynen M., Cheng B., Rinne E.* Multisensor data and thermodynamic sea-ice model based sea-ice thickness chart with application to the Kara Sea, Arctic Russia. *Annals of Glaciology*. 2013, 54 (62): 241–252. doi:10.3189/2013AoG62A163.
20. *Zakhvatkina N.Yu., Alexandrov V.Yu., Johannessen O.M., Sandven S., Frolov I.Ye.* Classification of Sea Ice Types in ENVISAT Synthetic Aperture Radar Images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2013, 51 (5): 2587–2600. doi: 10.1109/TGRS.2012.2212445.
21. *Zakhvatkina N.Yu., Bychkova I.A.* Bayesian Classification of the Ice Cover of the Arctic Seas. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2015, 51 (9): 883–888. doi: 10.1134/S0001433815090212.
22. *Rinne E., Similä M.* Utilisation of CryoSat-2 SAR altimeter in operational ice charting. *The Cryosphere*. 2016, 10: 121–131. doi: 10.5194/tc-10-121-2016.
23. *Mäkynen M., Karvonen J.* MODIS Sea Ice Thickness and Open Water–Sea Ice Charts over the Barents and Kara Seas for Development and Validation of Sea Ice Products from Microwave Sensor Data. *Remote Sensing*. 2017, 9: 1324. doi:10.3390/rs9121324.
24. *Zabolotskikh E.V., Khvorostovskii K.S., Balashova E.A., Kostylev A.I., Kudriavtsev V.N.* Identification of large-scale sea ice ridge areas in the Arctic using ASCAT data. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniia Zemli iz kosmosa*. Current problems in remote sensing of the Earth from space. 2020, 17 (3): 165–177. doi: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-165-177. [In Russian].
25. *Karvonen J., Rinne E., Sallila H., Uotila P., Mäkynen M.* Kara and Barents sea ice thickness estimation based on CryoSat-2 radar altimeter and Sentinel-1 dual-polarized synthetic aperture radar. *The Cryosphere*. 2022, 16: 1821–1844. doi: 10.5194/tc-16-1821-2022.
26. *Mahoney A.R., Barry R.G., Smolyanitsky V., Fetterer F.* Observed sea ice extent in the Russian Arctic, 1933–2006. *Journal of Geophysical Research*. 2008, 113: C11005. doi:10.1029/2008JC004830.
27. *Dumanskaia I.O.* *Ledovye usloviia morei evropeiskoi chasti Rossii*. Ice conditions of the seas of the European part of Russia. Moscow; Obninsk: Research Group “Social Sciences”, 2014: 608 p. [In Russian].
28. *Dumanskaia I.O.* *Ledovye usloviia morei aziatskoi chasti Rossii*. Ice conditions of the seas of the Asian part of Russia. Moscow; Obninsk: Research Group “Social Sciences”, 2017: 640 p. [In Russian].
29. *Karklin V.P., Khotchenkov S.V., Iulin A.V., Smolianitskii V.M.* Seasonal changes in the stages of sea ice development in northeast part of the Kara Sea during the autumn and winter period. *Problemy Arktiki i Antarkтики*. Problems of Arctic and Antarctic. 2016, 4 (110): 41–50. [In Russian].
30. *Karklin V.P., Khotchenkov S.V., Iulin A.V., Smolianitskii V.M.* Formation of the stages of sea ice development composition in the south-western part of the Kara Sea during autumn-winter season. *Problemy Arktiki i Antarkтики*. Problems of Arctic and Antarctic. 2017, 3 (113): 16–26. doi: 10.30758/0555-2648-2017-0-3-16-26. [In Russian].
31. *Khotchenkov S.V.* Stages of sea ice development in the Laptev Sea. *Problemy Arktiki i Antarkтики*. Problems of Arctic and Antarctic. 2017, 4 (114): 5–15. doi: 10.30758/0555-2648-2017-0-4-5-15. [In Russian].

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-2-118-132>
УДК 551.467



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

Характерные типы ледовых условий к северу от архипелага Шпицберген

А.В. Весман^{1}, Б.В. Иванов^{1,2}*

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

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

**anna.vesman@aari.ru*

Резюме

В данной статье рассматривается изменчивость ледовых условий к северу от архипелага Шпицберген. Большую часть года к северу от архипелага наблюдается устойчивая полынья, которую принято называть «Залив Китобоев». На основании данных о сплоченности льда с 1978 г. по настоящее время все многообразие ледовых условий было объединено в четыре основных типа. Тип 1 — район к северу от арх. Шпицберген покрыт льдом, тип 2 — кромка льда проходит к северу от архипелага, 3 — полынья «Залив Китобоев», 4 — промежуточный тип, когда образуется «проход» в Баренцево море между кромкой льда и северным побережьем архипелага. Была проанализирована повторяемость каждого из типов, выделены основные периодичности и тенденции, дана оценка изменению потока тепла, поступающего из океана в атмосферу в исследуемом регионе.

Ключевые слова: атлантические воды, архипелаг Шпицберген, «Залив Китобоев», изменения климата, морской лед.

Для цитирования: Весман А.В., Иванов Б.В. Характерные типы ледовых условий к северу от архипелага Шпицберген // Проблемы Арктики и Антарктики. 2022. Т. 68. № 2. С. 118–132. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-2-118-132>.

Поступила 16.05.2022

После переработки 06.06.2022

Принята 20.06.2022

Types of sea ice conditions north of Spitzbergen archipelago

Anna V. Vesman^{1}, Boris V. Ivanov^{1,2}*

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

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

**anna.vesman@aari.ru*

Summary

Sea ice is an important part of the Arctic climate system. In the recent decade, rapid changes in the sea ice conditions have been observed: sea ice extent and sea ice thickness are declining; conversely, ice drift speed and deformations are increasing [1–10]. The main aim of this paper was to describe the variability of sea ice conditions north of the Svalbard archipelago and analyze the changes occurring there. For most of the year, a stable polynya is observed north of the archipelago, which is commonly called “Whalers Bay”. The prevailing wind direction (8–9 months out of 12) is north-east, thus, almost throughout the whole year, conditions persist that support the flow of warmer Atlantic waters (AW) to the surface. Stable upwelling, together with the observed increase in AW’s temperature, contributes to the formation of the quasi-stationary polynya “Whalers Bay”. The ice conditions north of the Spitsbergen archipelago are changing extremely dynamically. However, all their diversity can be grouped into four main types. Type 1 — the area to the north of the archipelago is covered with ice; type 2 — the ice edge moves to the north of the archipelago; 3 — “Whalers Bay” polynya; 4 — an intermediate type, when a “passage” is formed to the Barents Sea between the ice edge and the northern coast of the archipelago. This study showed that since the mid-1990s the frequency of type 1 has significantly decreased, conversely, type 3 has become predominant, and the frequency of occurrence of type 2 has also increased. The maximum area of the polynya was observed in February 2012 and 2014, when the ice edge reached 82,5°N and 50°E, and 83°N and 46°E respectively. The lightest ice conditions were observed in 2012, 2013 and 2016. The main periods of 2–3, 5–6 and 14 years were identified in open water area variability. The ice cover to the north of the archipelago is largely presented by the conditions similar to the marginal ice zone with an actively changing ice edge configuration and the combined influence of factors characteristic of open sea areas and ice-covered areas. It is here that intense heat exchange takes place between the ocean and the atmosphere. The heat fluxes directed from the ocean to the atmosphere in the area of the polynya have increased by about 4 TW over the past 40 years. The highest correlation between the heat flux and the area of open water is observed with a lag of 2 months.

Keywords: Atlantic waters, climate change, ice edge, sea ice cover, Spitsbergen, Whalers Bay.

For Citation: Vesman A.V., Ivanov B.V. Types of sea ice conditions north of Spitzbergen archipelago. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2022, 68 (2): 118–132. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-2-118-132>.

Received 16.05.2022

Revised 06.06.2022

Accepted 20.06.2022

ВВЕДЕНИЕ

Морской лед — это важная часть меняющейся арктической климатической системы. Наблюдаемое сокращение площади морского ледяного покрова является одним из наиболее ярких проявлений современного изменения климата [1–3]. Сокращается не только площадь морского льда, но и его толщина [4–8]. Существенно сокращается площадь многолетнего морского льда [9–11]. При этом продолжительность периода его таяния увеличивается [12], возрастает скорость дрейфа льда и интенсивность его деформации (торошения) [13]. Отмечается важный вклад повышения температуры атлантических вод (АВ) в сокращение площади морского ледяного покрова [14–16]. Сокращение наблюдается во все сезоны, но наиболее выражены эти потери в летний период в конце сезона таяния [5, 17]. Несмотря на то, что изменению площади льда в Арктике уделяется большое внимание и, особенно в последние годы, опубликован ряд статей, в которых рассматривается изменение ледяного покрова в зимний период или среднегодовые условия [11, 18–21], чаще всего исследования фокусируются на сокращении площади летнего ледяного покрова [22]. В то же время закономерности и особенности изменений и изменчивости характеристик ледяного покрова в зависимости от сезона или региона исследования остаются слабо изученными [22]. Понимание и корректное описание указанных

процессов в различных районах Арктики может быть использовано для улучшения климатических прогнозов для средних и высоких широт Северного полушария [23]. Известно, что различные регионы Арктики вносят неравный вклад в формирование аномалий крупномасштабной циркуляции атмосферы [24]. Таким образом, особенности региональных и сезонных характеристик ледяного покрова в Арктике требуют внимательного изучения.

Поскольку воды, омывающие архипелаг Шпицберген, частично находятся под воздействием теплых АВ, часть времени они остается свободными ото льда. Только на севере и востоке от архипелага Шпицберген большую часть года наблюдается морской ледяной покров. В данном исследовании основное внимание мы уделяем району к северу от архипелага Шпицберген, который известен под названием «Залив Китобоев». В данный район поступают наиболее теплые АВ, по сравнению с другими внутренними районами Арктического бассейна (АБ), и здесь наблюдается максимальная интенсивность энергомассообмена океана с атмосферой. Ряд исследований [18, 25–27] оценивают поток тепла из океана в атмосферу в зимний период в среднем в $200\text{--}500\text{ Вт/м}^2$ и утверждают, что перемешивание между АВ и более холодными поверхностными водами обеспечивает достаточно тепла, чтобы поддерживать «Залив Китобоев» свободным ото льда [28].

«Залив Китобоев» — это устойчивая полынья, существование которой наблюдается круглый год. Международная номенклатура по морским льдам определила полынью как устойчивое пространство чистой воды среди или на границе неподвижных льдов [29]. Иногда полыньи с одной стороны ограничиваются берегом и тогда носят название прибрежных. «Залив Китобоев» принято называть шельфовой прибрежной полыньей, хотя он и не «закрыт» льдом со всех сторон. По механизму образования и последующей динамики полыньи традиционно разделяются на два класса: полыньи «явного» и «скрытого» тепла [30]. Полыньи явного тепла обусловлены термическим воздействием. Они появляются в результате поступления к поверхности океанического тепла достаточного, чтобы растопить ранее образовавшийся лед и минимизировать его дальнейшее образование в зоне возникшей полыньи. Таким образом, в районе полыней явного типа образуется мало льда, а площадь самой полыньи зависит от интенсивности и продолжительности поступления к поверхности теплых вод. Полыньи скрытого типа образуются механически в областях, где наблюдается дивергенция дрейфа льда из-за преобладающих ветров или океанических течений. Такие полыньи являются районами постоянного ледообразования [30]. «Залив Китобоев» подвержен совместному влиянию обоих описанных выше процессов. При преобладании южных и юго-восточных ветров лед относится от берега, образуя полынью, при этом тепло АВ приводит к таянию льда и предотвращению его дальнейшего образования. Активная теплоотдача из океана в атмосферу к северу от архипелага Шпицберген обуславливает трансформацию АВ в промежуточные арктические воды (ПАВ) [25]. Размер полыньи влияет на температуру атмосферы в приземном и пограничном слоях даже на расстоянии до 200 км к югу от полыньи и на эволюцию конвективного атмосферного пограничного слоя во время вторжений холодного воздуха из Центральной Арктики [31]. Основными задачами данной статьи было рассмотреть характеристики ледяного покрова к северу от архипелага Шпицберген, выделить и описать его основные закономерности и особенности, а также оценить факторы, которые могут оказывать влияние на формирования ледовых условий.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА

Непрерывный мониторинг морского ледяного покрова на ежедневной основе начался с запуска спутника SeaSat в июне 1978 г. и в октябре того же года спутника Nimbus 7. Оба имеют на борту радиометр SMMR (сканирующий многоканальный микроволновый радиометр) производства США. Это был первый спутниковый много-частотный микроволновый радиометр с двойной поляризацией. Он особенно хорошо подходил для мониторинга состояния и динамики морского льда. Этот радиометр до сих пор обеспечивает непрерывные наблюдения за морским льдом начиная с 1978 г.

Прикладной комплекс для спутникового мониторинга океана и морского льда (OSI SAF) — это часть Европейской организации по эксплуатации метеорологических спутников (EUMETSAT) для производства оперативной спутниковой продукции. Ледовые продукты OSI SAF в высоких широтах производятся совместно Норвежским метеорологическим институтом и Датским метеорологическим институтом. В данной статье используется объединенный ряд данных радиометров SMMR, SSM/I (специальный микроволновый датчик/имиджер) и SSMIS (специальный микроволновый датчик эхолот-имиджер) о сплоченности льда в Арктике с 1998 г. по настоящее время, с пространственным разрешением 25×25 км и временным разрешением — 1 месяц [32].

Площадь открытой воды рассчитывалась как сумма ячеек сетки, удовлетворяющих условию: сплоченность льда составляет менее 15 %. Параметр 15 % выбран, так как из-за относительно низкого разрешения датчиков ни один алгоритм на данный момент не может с достаточной точностью различить лед, если его сплоченность ниже данного значения [33, 34]. Площадь открытой воды рассчитывалась в пределах зоны, очерченной параллелями 79° и $82,5^\circ$ с. ш. и меридианами 5° и 40° в. д. (рис. 1).

Ледовые условия к северу от архипелага Шпицберген меняются крайне динамично. Однако все их многообразие можно объединить в четыре основных типа. Тип 1 — район к северу от арх. Шпицберген покрыт льдом, тип 2 — существование полыньи «Залив Китобоев», 3 — кромка льда проходит к северу от архипелага, 4 — промежуточный тип, когда образуется «проход» в Баренцево море между кромкой льда и северным побережьем архипелага (рис. 2).

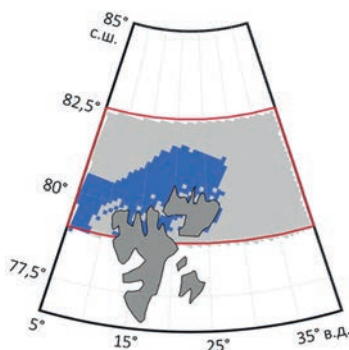


Рис. 1. Пример схемы расчета площади открытой воды к северу от архипелага Шпицберген. Серый цвет — лед сплоченностью более 15 %, синий — сплоченность менее 15 %, красная граница — зона расчета

Fig. 1. An example of a scheme for calculating the area of open water north of the Svalbard archipelago. Gray color — ice with concentration greater than 15 %, blue — ice concentration less than 15 %, red border — calculation zone

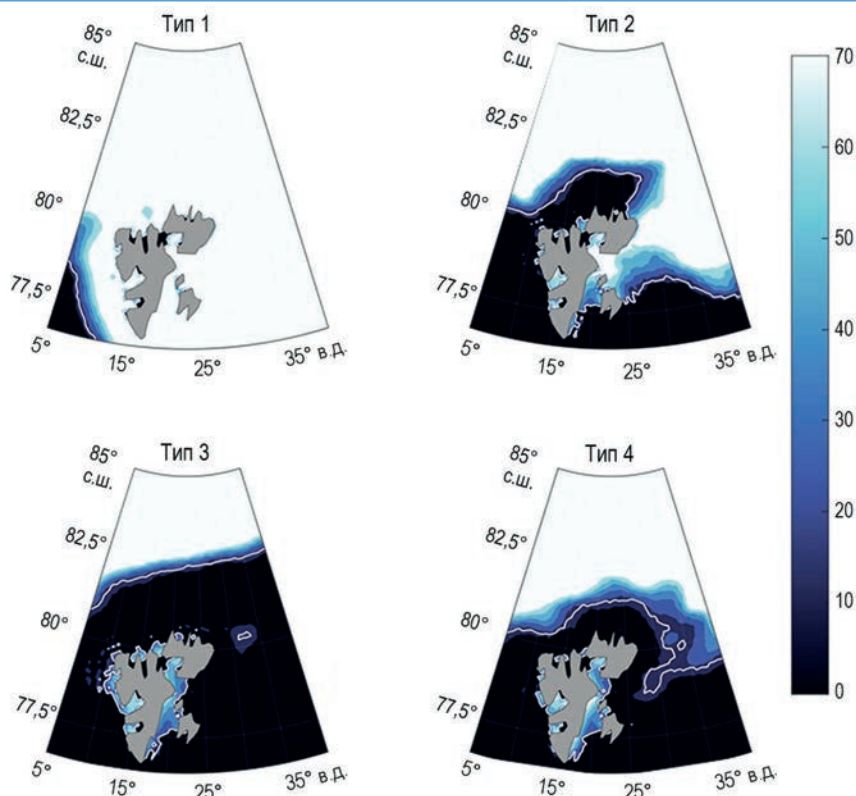


Рис. 2. Иллюстрации типичных ситуаций распространения морского ледяного покрова к северу от архипелага Шпицберген, цветовая шкала — сплоченность льда, %

Fig. 2. Illustrations of typical sea ice conditions north of the Svalbard archipelago, color scale — ice concentration, %

Разделение ледовых ситуаций по типам происходило в два этапа:

1. Кромка льда, соответствующая границе — сплоченность льда $> 15\%$, аппроксимировалась кривой второго порядка. В зависимости от формы полученной параболы (пересекала или нет полученная линия берег) и других вспомогательных параметров (коэффициентов, описывающих кривизну) ситуация автоматически относилась к одному из типов.

2. Результаты, полученные автоматически, просматривались визуально, если тип не соответствовал наблюдаемой картине, решение принималось на основе визуального анализа.

Для сравнения типа ледовых условий с приземной температурой воздуха (ПТВ) использованы сведения о среднемесячных значениях ПТВ на архипелаге Шпицберген, представляющие собой осредненные данные норвежских и российских метеорологических станций [35–40].

Также для совместного анализа использовались данные реанализа ERA5 о потоках тепла на границе океан — атмосфера [42]. При совместном анализе атмосферных, океанических и ледовых параметров использовались ряды данных, полученные только для периода регулярных спутниковых наблюдений [32].

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЙ К СЕВЕРУ ОТ АРХИПЕЛАГА ШПИЦБЕРГЕН

На рис. 3 представлен график повторяемости типов ледовых условий. В начале ряда наиболее часто встречается тип 1 (кромка льда доходит до побережья архипелага). С 1997 г. можно отметить перестройку системы, когда преобладающим типом становится тип 2 (образуется полынья «Залив Китобоев»). Повторяемость этого типа растет со временем с некоторым снижением в последние 7 лет, в то время как повторяемость типа 1 существенно снижается с конца 80-х — начала 90-х. Середина 90-х также является переломным моментом, начиная с которого тип 3 (побережье свободно ото льда) начинает появляться регулярно. Повторяемость и продолжительность этого типа также растут. Тип 4 (переходный) наблюдается только в отдельные годы (1990, 1992, 2002, 2006, 2010, 2013, 2016–2018).

Если рассмотреть сезонный ход типов ледовых условий, то можно выделить следующие закономерности: наиболее часто воды к северу от архипелага покрыты льдом с марта по июнь и реже всего в сентябре (рис. 4). До 2007 г. данный тип наблюдается в «зимний» период с января по апрель, но с 2007 г. он чаще всего наблюдается в календарную весну в апреле–мае, иногда захватывая летние месяцы. В свою очередь, акватория обычно очищается ото льда в августе–октябре. В начале ряда наблюдений кромка льда не пересекает 82° с. ш., но со временем сдвигается дальше на север. Обычно кромка расположена южнее у западного побережья архипелага и севернее у восточного. В 2012 г. она уже пересекает 83° с. ш., а в сентябре 2013 г. достигает 84° с. ш. Полынья наблюдается вне зависимости от сезона, с максимумами повторяемости в декабре и январе. Максимальная площадь полыньи наблюдается в феврале 2012 и 2014 гг., когда кромка льда достигает $82,5^{\circ}$ с. ш. и 50° в. д. и 83° с. ш. и 46° в. д. соответственно. Переходный тип проявляется чаще всего в осенне-зимний период (в начале периода замерзания) с сентября по январь (рис. 4).

Площадь открытой воды к северу от архипелага Шпицберген обладает сильной внутригодовой изменчивостью. Наблюдается ярко выраженный положительный тренд (с 1978 по 2018 г.). Максимально легкие ледовые условия (максимальная площадь открытой воды) наблюдаются в 2012, 2013 и 2016 гг. Наиболее тяжелые ледовые условия наблюдаются в апреле, когда в среднем менее 20 % площади ре-

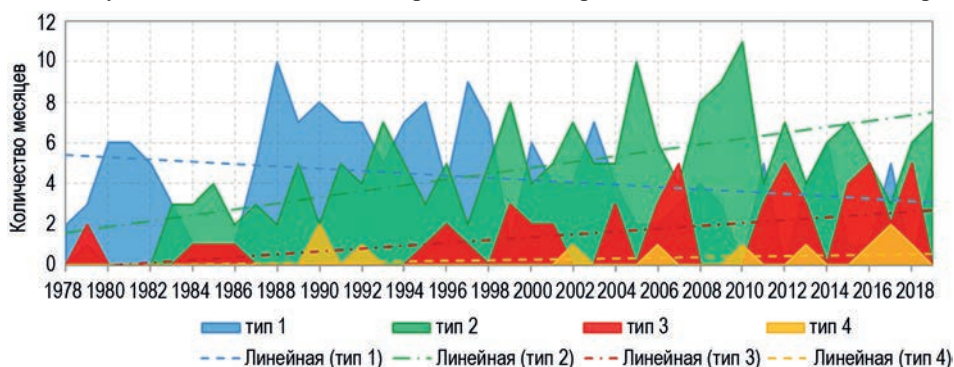


Рис. 3. Повторяемость типов положения ледяной кромки к северу от архипелага Шпицберген и тенденции повторяемости каждого из типов

Fig. 3. Recurrence of types of ice edge position north of the Svalbard archipelago and the recurrence tendencies for each type

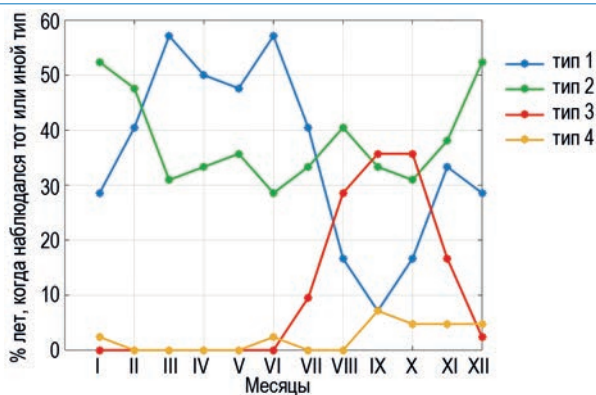


Рис. 4. Сезонный ход повторяемости типов ледяной кромки

Fig. 4. Seasonal changes of the recurrence of ice edge types

гиона свободны ото льда. Наиболее легкие условия наблюдаются в сентябре, когда в среднем 50 % площади очищается ото льда, в некоторые годы это значение превышает 90 % (рис. 5). В работе [42] отмечают, что сплоченность льда влияет на развитие апвеллинга АВ вдоль северного склона архипелага. При этом чем больше

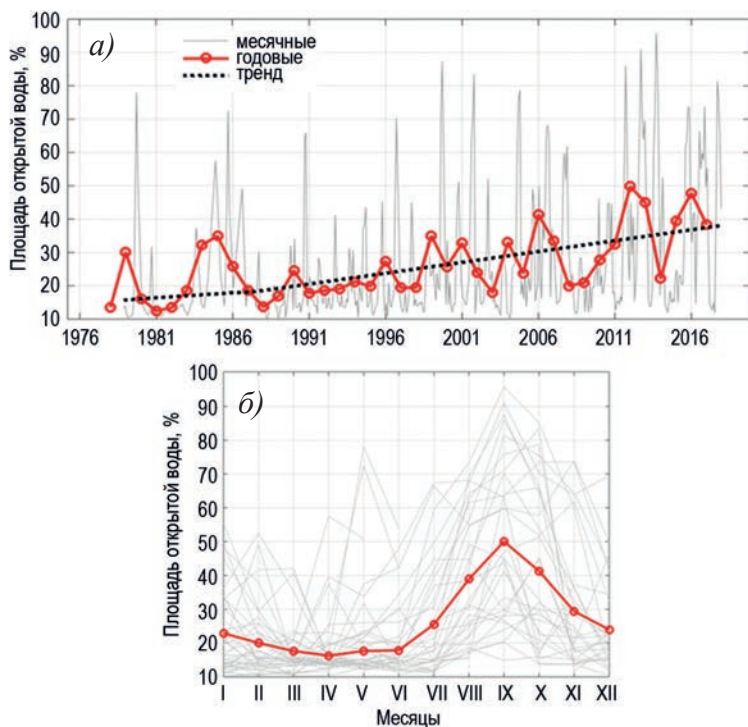


Рис. 5. Межгодовая изменчивость площади открытой воды (а), в процентах (%) от площади исследуемого района, сезонная изменчивость площади открытой воды (б), в % от площади исследуемого района

Fig. 5. Interannual variability of open water area (a), as a percentage (%) of the study area, seasonal variability of open water area, in % of the study area (b)

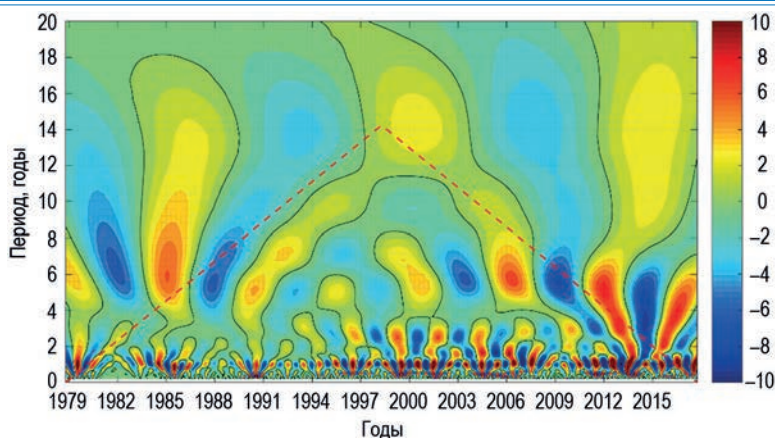


Рис. 6. Вейвлет-диаграмма, построенная для изменчивости площади открытой воды

Fig. 6. Wavelet diagram constructed for open water area variability

уменьшается площадь морского льда, тем интенсивнее будет развиваться апвеллинг. Это, в свою очередь, способствует поднятию на поверхность вод, богатых питательными веществами, что приводит к увеличению продуктивности поверхностных вод и привлечению новых видов организмов, характерных для более южных широт [42].

Помимо преобладающей тенденции к увеличению площади открытой воды к северу от архипелага Шпицберген (с 1978 по 2019 г. наблюдается положительный тренд $\sim 25\%$), можно выделить характерные колебания площади открытой воды с периодами, равными 2–3 и 5–6 годам (рис. 6), амплитуда которых увеличивается к концу ряда. Схожие периоды были выделены в работе [43] при анализе ледовитости Северо-Европейского бассейна (СЕБ). Также стоит отметить долгопериодную изменчивость, составляющую примерно 14 лет.

Временная изменчивость сплошности льда к северу от архипелага Шпицберген имеет высокую связь с аналогичной изменчивостью ПТВ (коэффициент корреляции 0,72). Однако, анализируя данные о ПТВ, нельзя забывать о положительной обратной связи. В первом приближении повышение ПТВ ведет к сокращению площади льда, а соответствующее увеличение площади свободной ото льда водной поверхности способствует последующему увеличению ПТВ за счет теплоотдачи от океана в атмосферу. Таким образом, из-за очевидной взаимозависимости ПТВ не рассматривалась как основной воздействующий фактор. Пики, выделенные по результатам вейвлет-анализа, хорошо соответствуют периодичностям, выделенным по данным о температуре АВ в ядре Западно-Шпицбергенского течения [44]. В изменчивости температуры АВ и площади открытой воды наблюдается заметная степень согласованности (рис. 7), однако коэффициент корреляции остается невысоким и составляет 0,47. При этом его максимальные значения наблюдаются на временном сдвиге, равном 1 месяцу (появление максимальных площадей открытой воды запаздывает относительно наблюдаемых максимумов температуры АВ). В среднем это соответствует скорости распространения АВ, при учете, что данные о температуре АВ получены на $78,8^\circ$ с. ш.

Помимо выявленных особенностей, важную роль в формировании полыньи играет направление приземного ветра. В первом приближении в воздействии ветра можно выделить два основных механизма. Первым механизмом является непосред-

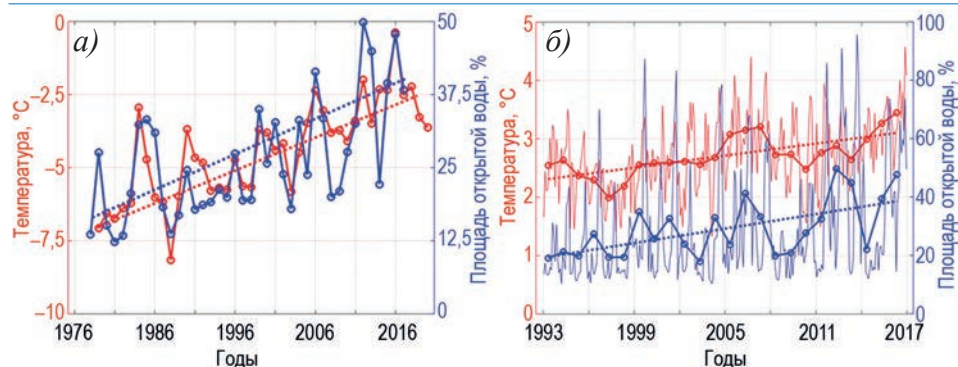


Рис. 7. Изменчивость площади открытой воды, температуры воздуха и температуры АВ: а) изменчивость среднегодовых значений температуры воздуха и площади открытой воды; б) среднемесячные и среднегодовые значения температуры АВ и площади открытой воды

Fig. 7. Variability of the open water area, air temperature and AW temperature: а) variability of mean annual air temperature and open water area; б) average monthly and average annual values of AW temperature and area of open water

ственный дрейф льда под воздействием ветра — ветра северных румбов способствуют выносу льда из АВ и приводят к «закрытию» полыни, в то время как ветра южных румбов приводят к смещению кромки льда в северном направлении. Вторым механизмом является преобладание ветров, способствующих образованию апвеллинга. В случае с северным побережьем архипелага Шпицберген было отмечено, что таким преобладающим направлением является северо-восточное, обеспечивающее практически на протяжении всего года условия, при которых поддерживается поступление более теплых АВ к поверхности. Практически постоянный апвеллинг, вместе с увеличением температуры АВ, способствуют поддержанию «Залива Китобоев» свободным ото льда. Помимо прямой взаимосвязи между ПТВ и площадью открытой воды/сплоченностью льда к северу от архипелага, при которой увеличение ПТВ способствует сокращению площади льда, наблюдается сильная обратная связь — с увеличением площади полыни и продолжительности ее существования

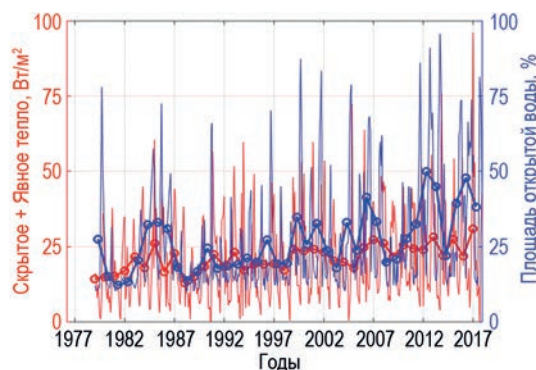


Рис. 8. Изменчивость величин потоков тепла из океана в атмосферу и площадей открытой воды (тонкие линии — среднемесячные данные, толстые — среднегодовые)

Fig. 8. Variability of the ocean-atmosphere heat flux and open water area (thin lines are monthly average data, thick lines are annual averages)

увеличивается суммарный поток тепла, направленный из океана в атмосферу, что способствует повышению ПТВ в регионе. В работе [22] отмечается, что значительное количество тепла, переносимое АВ, достигает поверхности океана. Таким образом, наблюдаемое в последние десятилетия увеличение температуры АВ [44] еще больше усиливает теплоотдачу из океана в атмосферу. С помощью реанализа ERA5 были рассчитаны величины межгодовой изменчивости потока тепла, направленного из океана в атмосферу в районе полыньи «Залив Китобоев». В полученных данных выделяется положительный тренд (4 ТВт за последние 40 лет). Максимальная корреляция (0,52) наблюдается на временном сдвиге в 2 месяца, при этом максимальные значения потоков тепла запаздывают относительно максимальных площадей открытой воды, что происходит вследствие постепенного увеличения градиента между температурой поверхности океана (растет за счет поступления теплых АВ на поверхность) и ПТВ. При годовом осреднении корреляция возрастает до 0,6. Изменчивость потоков тепла и площадей открытой воды представлена на рис. 8.

ВЫВОДЫ

– Середина 1990-х гг. является переломным моментом, когда повторяемость появления типа 1 (акватория к северу от Шпицбергена покрыта льдом) существенно снижается, а преобладающим становится тип 3 — «существование квазистационарной полыньи», а также растет повторяемость появления типа 2 — «побережье свободно ото льда».

– Переходный четвертый тип наблюдался только в отдельные годы: 1990, 1992, 2002, 2006, 2010, 2013, 2016–2018, чаще всего в осенне-зимний период (в начале периода замерзания) с сентября по январь.

– Изменчивость площади открытой воды характеризуется периодами колебаний равными 2–3, 5–6 и 14 годам.

– Потоки тепла, направленные из океана в атмосферу в районе полыньи «Залив Китобоев», увеличились примерно на 4 ТВт за последние 40 лет. Наибольшая взаимосвязь между потоком тепла и площадью открытой воды наблюдается на сдвиге в 2 месяца.

Конфликт интересов. Авторы статьи не имеют конфликта интересов.

Финансирование. Работа выполнена в рамках раздела 5.1.4 «Мониторинг состояния и загрязнения природной среды, включая криосферу, в Арктическом бассейне и районах научно-исследовательского стационара “Ледовая база Мыс Баранова”, Гидрометеорологической обсерватории Тикси и Российского научного центра на архипелаге Шпицберген» (проект 5.1 НИТР Росгидромета).

Competing interests. The authors have no conflicts of interests.

Funding. The work was carried out within the framework of section 5.1.4 “Monitoring of the state and pollution of the natural environment, including the cryosphere, in the Arctic basin and areas of the research station “Ice Base Cape Baranov”, the Tiksi Hydrometeorological Observatory and the Russian Scientific Center on the Svalbard Archipelago” (project 5.1 NITR Roshydromet).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Serreze M.C., Barry R.G. Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis // Global and planetary change. 2011. V. 77. № 1–2. С. 85–96.

2. *Alekseev G.V., Aleksandrov E.I., Glok N.I., Ivanov N.E., Smolyanitsky V.M., Kharlanenkova N.E., Yulin A.V.* Arctic sea ice cover in connection with climate change // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2015. T. 51. № 9. С. 889–902.
3. *Тисленко Д.И., Иванов Б.В., Смоляницкий В.М., Священников П.Н., Весман А.В., Isaksen K., Gjeltén H.* Сезонные и многолетние изменения ледовитости в районе архипелага Шпицберген // Современное состояние природной среды архипелага Шпицберген: Коллективная монография, под общей редакцией д. г. н. Саватюгина Л.М. СПб.: ААНИИ, 2020. С. 95–103.
4. *Kwok R., Rothrock D.A.* Decline in Arctic sea ice thickness from submarine and ICESat records: 1958–2008 // *Geophysical Research Letters*. 2009. V. 36. L15501. doi:10.1029/2009GL039035.
5. *Cavalieri D.J., Parkinson C.L.* Arctic sea ice variability and trends, 1979–2010 // *The Cryosphere*. 2012. V. 6. № 4. P. 881–889.
6. *Vinje T.* Anomalies and trends of sea-ice extent and atmospheric circulation in the Nordic Seas during the period 1864–1998 // *Journal of Climate*. 2001. V. 14. № 3. P. 255–267.
7. *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. Т. 57. № 3. С. 381–390.
8. *Иванов Б.В.* Современные изменения гидрометеорологических условий в Северном Ледовитом океане, связанные с сокращением морского ледяного покрова // *Гидрометеорология и экология*. 2021. № 64. С. 407–434.
9. *Maslanik J.A., Fowler C., Stroeve J., Drobot S., Zwally J., Yi D., Emery W.* A younger, thinner Arctic ice cover: Increased potential for rapid, extensive sea-ice loss // *Geophysical Research Letters*. 2007. V. 34. L24501. doi: 10.1029/2007GL032043.
10. *Nghiem S.V., Rigor I.G., Perovich D.K., Clemente-Colón P., Weatherly J.W., Neumann G.* Rapid reduction of Arctic perennial sea ice // *Geophysical Research Letters*. 2007. V. 34. L19504. doi: 10.1029/2007GL031138.
11. *Юлин А.В., Вязигина Н.А., Егорова Е.С.* Межгодовая и сезонная изменчивость площади льдов в Северном Ледовитом океане по данным спутниковых наблюдений // *Российская Арктика*. 2019. № 7. С. 28–40.
12. *Stroeve J.C., Markus T., Boisvert L., Miller J., Barrett A.* Changes in Arctic melt season and implications for sea ice loss // *Geophysical Research Letters*. 2014. V. 41. P. 1216–1225.
13. *Rampal P., Weiss J., Marsan D.* Positive trend in the mean speed and deformation rate of Arctic sea ice, 1979–2007 // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2009. V. 114. C05013. doi: 10.1029/2008JC005066.
14. *Polyakov I.V., Pnyushkov A.V., Alkire M.B., Ashik I.M., Baumann T.M., Carmack E.C., Goszczko I., Guthrie J., Ivanov V.V., Kanzow T., Krishfield R., Kwok R., Sundfjord A., Morison J., Rember R., Yulin A.* Greater role for Atlantic inflows on sea-ice loss in the Eurasian Basin of the Arctic Ocean // *Science*. 2017. V. 356 (6335). P. 285–291. doi: 10.1126/science.aai8204.
15. *Аксенов П.В., Иванов Б.В.* «Атлантификация» как вероятная причина сокращения площади морского льда в бассейне Нансена в зимний сезон // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2018. Т. 64. № 1. С. 42–54.
16. *Selyuzhenok V., Bashmachnikov I., Ricker R., Vesman A., Bobylev L.* Sea ice volume variability and water temperature in the Greenland Sea // *The Cryosphere*. 2020. V. 14. № 2. P. 477–495.
17. *Serreze M. C., Holland M. M., Stroeve J.* Perspectives on the Arctic's shrinking sea-ice cover // *Science*. 2007. V. 315. № 5818. P. 1533–1536.
18. *Иванов Б.В., Тимачев В.Ф., Священников П.Н., Макитас А.П., Бедненко В.М., Павлов А.К.* Энергомассообмен между океаном и атмосферой в районе зимней полыньи к северу от архипелага Шпицберген // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2013. Т. 2. № 96. С. 111–117.
19. *Тисленко Д.И., Иванов Б.В.* Долгопериодная изменчивость температуры атлантических вод во фьордах острова Западный Шпицберген в период первого (1920–1940 гг.) и современного потепления в Арктике // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2015. Т. 2. № 104. С. 93–100.

20. Шапкин Б.С., Рубчenea А.В., Иванов Б.В., Ревина А.Д., Багрянцев М.В. Многолетние изменения ледовитости в районе архипелагов Шпицберген и Земля Франца-Иосифа // Лед и Снег. 2021. Т. 61. № 1. С. 128–136.
21. Егоров А.Г. Изменение возрастного состава и толщины зимнего ледяного покрова арктических морей России в начале XXI в // Проблемы Арктики и Антарктики. 2020. Т. 66. № 2. С. 124–143.
22. Onarheim I.H., Eldevik T., Smedsrud L.H., Stroeve J.C. Seasonal and regional manifestation of Arctic sea ice loss // Journal of Climate. 2018. V. 31. № 12. P. 4917–4932.
23. Koenigk T., Caian M., Nikulin G., Schimanke S. Regional Arctic sea ice variations as predictor for winter climate conditions // Climate Dynamics. 2016. V. 46. № 1–2. P. 317–337.
24. Screen J.A. Simulated atmospheric response to regional and pan-Arctic sea ice loss // Journal of Climate. 2017. V. 30. № 11. P. 3945–3962.
25. Aagaard K., Foldvik A., Hillman S.R. The West Spitsbergen Current: disposition and water mass transformation // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1987. V. 92. № C4. P. 3778–3784.
26. Saloranta T.M., Haugan P.M. Northward cooling and freshening of the warm core of the West Spitsbergen Current // Polar Research. 2004. V. 23. № 1. P. 79–88.
27. Cokelet E.D., Tervalon N., Bellingham J.G. Hydrography of the West Spitsbergen current, Svalbard branch: autumn 2001 // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2008. V. 113. C01006. doi: 10.1029/2007JC004150.
28. Onarheim I.H., Smedsrud L.H., Ingvaldsen R.B., Nilsen F. Loss of sea ice during winter north of Svalbard // Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography. 2014. V. 66 (1). 23933. doi: 10.3402/tellusa.v66.23933.
29. World Meteorological Organization (WMO). WMO sea-ice nomenclature: terminology, codes and illustrated glossary. WMO Publication. Secretary of the World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland. 2014. V. 259 (1). P. 121.
30. Maqueda M.A., Willmott A.J., Biggs N.R.T. Polynya dynamics: A review of observations and modeling // Reviews of Geophysics. 2004. V. 42. RG1004. doi: 10.1029/2002RG000116.
31. Tetzlaff A., Lüpkes C., Birnbaum G., Hartmann J., Nygård T., Vihma T. Brief Communication: Trends in sea ice extent north of Svalbard and its impact on cold air outbreaks as observed in spring 2013 // The Cryosphere. 2014. V. 8. № 5. P. 1757–1762. doi: 10.5194/tc-8-1757-2014.
32. EUMETSAT Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility. Global sea ice concentration reprocessing dataset 1978–2015: [Электронный ресурс] // Norwegian and Danish Meteorological Institutes. 2015. URL: <https://osi-saf.eumetsat.int/products/sea-ice-products> (дата обращения 26.06.2022) [база данных].
33. Hwang B.J., Barber D.G. Pixel-scale evaluation of SSM/I sea-ice algorithms in the marginal ice zone during early fall freeze-up // Hydrological Processes. 2006. V. 20. № 9. P. 1909–1927.
34. Goldstein M.A., Lynch A.H., Zsom A., Arbetter T., Chang A., Fetterer F. The step-like evolution of Arctic open water // Sci Rep. 2018. V. 8 (1). 16902. doi: 10.1038/s41598-018-35064-5.
35. Иванов Б.В., Священников П.Н., Уразилдеева А.В., Прохорова В.В., Весман А.В., Пантелеев В.В., Тисленко Д.И. Среднемесячная температура приземного слоя воздуха на архипелаге Шпицберген по данным норвежских и российских метеорологических станций за период 1898–2014 гг. (SAT). Свидетельство о государственной регистрации № 2016621093 от 10.08.2016 [база данных].
36. Nordli Ø., Przybylak R., Ogilvie A. E., Isaksen K. Long-term temperature trends and variability on Spitsbergen: the extended Svalbard Airport temperature series, 1898–2012 // Polar Research. 2014. V. 33. 21349. <https://doi.org/10.3402/polar.v33.21349>.
37. Nordli Ø., Wyszynski P., Gjeltén H., Isaksen K., Łupikasz E., Niedźwiedz T., Przybylak R. Revisiting the extended Svalbard Airport monthly temperature series, and the compiled corresponding daily series 1898–2018. URL: <http://repozytorium.umk.pl/handle/item/6323> (дата обращения 01.09.2021) [база данных].
38. Gjeltén H.M., Nordli Ø., Isaksen K., Førland E.J., Sviashchennikov P.N., Wyszynski P., Prokhorova U., Przybylak R., Ivanov B.V., Urazgildeeva A.V. Air temperature variations and gradients along the coast and fjords of western Spitsbergen // Polar Research. 2016. V. 35 (1). 29878. doi: 10.3402/polar.v35.29878.

39. Демин В.И., Иванов Б.В., Ревина А.Д. Среднемесячная температура приземного слоя воздуха (восстановленный ряд) в поселке Баренцбург (архипелаг Шпицберген) за период 1911–2018 гг. (SAT_BBG_II). База данных. Свидетельство о государственной регистрации № 2020620164 от 29.01.2020.
40. Демин В.И., Иванов Б.В., Ревина А.Д. Восстановление ряда приземной температуры воздуха на Российской станции в поселке «Баренцбург» (Шпицберген) // Российская Арктика. 2020. № 9. С. 3040.
41. Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., Thépaut, J.-N. ERA5 monthly averaged data on single levels from 1979 to present: [Электронный ресурс] // Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). 2019 <https://doi.org/10.24381/cds.fl7050d7> (дата обращения 26.08.2021) [база данных].
42. Falk-Petersen S., Pavlov V., Berge J., Cottier F., Kovacs K.M., Lydersen C. At the rainbow's end: high productivity fueled by winter upwelling along an Arctic shelf // Polar Biology. 2015. V. 38. № 1. P. 5–11.
43. Зубакин Г.К. Крупномасштабная изменчивость состояния ледяного покрова морей Северо-Европейского бассейна. Л.: Гидрометеониздат, 1987. 160 с.
44. Vesman A.V., Ivanov B.V., Volkov V.A. Changes in thermohaline system on the west Spitsbergen shelf since 1950 to present time // Czech Polar Reports. 2017. T. 7. № 1. С. 62–73.

REFERENCES

1. Serreze M.C., Barry R.G. Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis. Global and planetary change. 2011, 77 (1–2): 85–96.
2. Alekseev G.V., Aleksandrov E.I., Glok N.I., Ivanov N.E., Smolyanitsky V.M., Kharlanenkova N.E., Yulin A.V. Arctic sea ice cover in connection with climate change. Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2015, 51 (9): 889–902.
3. Tislenko D.I., Ivanov B.V., Smolianitskii V.M., Sviashchennikov P.N., Vesman A.V., Isaksen K., Gjellen H. Sezonnye i mnogoletnie izmeneniia ledovitosti v raione arhipelaga Shpitsbergen. Seasonal and long-term changes in ice cover in the area of the Spitsbergen archipelago. The current state of the natural environment of the Spitsbergen archipelago: a collective monograph, under the general editorship of Dr. Savatyugin L.M. St. Petersburg: AARI, 2020: 95–103. [In Russian].
4. Kwok R., Rothrock D.A. Decline in Arctic sea ice thickness from submarine and ICESat records: 1958–2008. Geophysical Research Letters. 2009, 36: L15501. doi: 10.1029/2009GL039035.
5. Cavalieri D.J., Parkinson C.L. Arctic sea ice variability and trends, 1979–2010. The Cryosphere. 2012, 6 (4): 881–889.
6. Vinje T. Anomalies and trends of sea-ice extent and atmospheric circulation in the Nordic Seas during the period 1864–1998. Journal of Climate. 2001, 14 (3): 255–267.
7. Alekseev G.V., Kuzmina S.I., Glok N.I., Vyazilova A.E., Ivanov N.E., Smirnov A.V. Influence of Atlantic on the warming and reduction of sea ice in the Arctic. Led i Sneg. Ice and Snow. 2017, 57 (3): 381–390. [In Russian]. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2017-3-381-390>.
8. Ivanov V.V. Modern changes in hydrometeorological conditions in the Arctic Ocean associated with the reduction of sea ice cover. Gidrometeorologiya i ekologiya. Hydrometeorology and Ecology. 2021, 64: 407–434. [In Russian].
9. Maslanik J.A., Fowler C., Stroeve J., Drobot S., Zwally J., Yi D., Emery W. A younger, thinner Arctic ice cover: Increased potential for rapid, extensive sea-ice loss. Geophysical Research Letters. 2007, 34: L24501. doi: 10.1029/2007GL032043.
10. Nghiem S.V., Rigor I.G., Perovich D.K., Clemente-Colón P., Weatherly J.W., Neumann G. Rapid reduction of Arctic perennial sea ice. Geophysical Research Letters. 2007, 34: L19504. doi: 10.1029/2007GL031138.

11. Yulin A.V., Vyazigina N.A., Egorova E.S. Interannual and seasonal variability of ice area in the Arctic Ocean according to satellite observations. *Rossiyskaya Arktika*. Russian Arctic. 2019, (7): 28–40. [In Russian].
12. Stroeve J.C., Markus T., Boisvert L., Miller J., Barrett A. Changes in Arctic melt season and implications for sea ice loss. *Geophysical Research Letters*. 2014, 41: 1216–1225.
13. Rampal P., Weiss J., Marsan D. Positive trend in the mean speed and deformation rate of Arctic sea ice, 1979–2007. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2009, 114: C05013. doi: 10.1029/2008JC005066.
14. Polyakov I.V., Pnyushkov A.V., Alkire M.B., Ashik I.M., Baumann T.M., Carmack E.C., Goszczko I., Guthrie J., Ivanov V.V., Kanzow T., Krishfield R., Kwok R., Sundfjord A., Morison J., Rember R., Yulin A. Greater role for Atlantic inflows on sea-ice loss in the Eurasian Basin of the Arctic Ocean. *Science*. 2017, 356 (6335): 285–291. doi: 10.1126/science.aai8204.
15. Aksenov P.V., Ivanov V.V. “Atlantification” as a Possible Cause for Reducing of the Sea-Ice Cover in the Nansen Basin in winter. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2018, 64 (1): 42–54. [In Russian]. doi: 10.30758/0555-2648-2018-64-1-42-54.
16. Selyuzhenok V., Bashmachnikov I., Ricker R., Vesman A., Bobylev L. Sea ice volume variability and water temperature in the Greenland Sea. *The Cryosphere*. 2020, 14 (2): 477–495.
17. Serreze M.C., Holland M.M., Stroeve J. Perspectives on the Arctic’s shrinking sea-ice cover. *Science*. 2007, 315 (5818): 1533–1536.
18. Ivanov B.V., Timachev V.F., Sviashchennikov P.N., Makshtas A.P., Bednenko V.M., Pavlov A.K. Energy and mass transfer between the ocean and the atmosphere in the area of the winter polynya to the north of the Spitsbergen archipelago. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of Arctic and Antarctic. 2013, 2 (96): 111–117. [In Russian].
19. Tislenko D.I., Ivanov B.V. Long-term variability of the temperature of the Atlantic waters in the fjords of the island of West Spitsbergen during the first (1920–1940) and modern warming in the Arctic. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of the Arctic and Antarctic. 2015, 2 (104): 93–100. [In Russian].
20. Shapkin B.S., Rubchenya A.V., Ivanov B.V., Revina A.D., Bagryantsev M.V. Long-term changes in ice cover in the area of the Svalbard and Franz Josef Land archipelagos. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2021, 61 (1): 128–136. [In Russian].
21. Egorov A.G. Change in the age composition and thickness of the winter ice cover of the Arctic seas of Russia at the beginning of the XXI century. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2020, 66 (2): 124–143. [In Russian].
22. Onarheim I.H., Eldevik T., Smedsrud L.H., Stroeve J.C. Seasonal and regional manifestation of Arctic sea ice loss. *Journal of Climate*. 2018, 31 (12): 4917–4932.
23. Koenigk T., Caian M., Nikulin G., Schimanke S. Regional Arctic sea ice variations as predictor for winter climate conditions. *Climate Dynamics*. 2016, 46 (1–2): 317–337.
24. Screen J. A. Simulated atmospheric response to regional and pan-Arctic sea ice loss. *Journal of Climate*. 2017, 30 (11): 3945–3962.
25. Aagaard K., Foldvik A., Hillman S.R. The West Spitsbergen Current: disposition and water mass transformation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1987, 92 (C4): 3778–3784.
26. Saloranta T.M., Haugan P.M. Northward cooling and freshening of the warm core of the West Spitsbergen Current. *Polar Research*. 2004, 23 (1): 79–88.
27. Cokelet E.D., Tervalon N., Bellingham J.G. Hydrography of the West Spitsbergen current, Svalbard branch: autumn 2001. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2008, 113: C01006. doi: 10.1029/2007JC004150.
28. Onarheim I.H., Smedsrud L.H., Ingvaldsen R.B., Nilsen F. Loss of sea ice during winter north of Svalbard. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. 2014, 66 (1): 23933. doi: 10.3402/tellusa.v66.23933.

29. *World Meteorological Organization (WMO)*. WMO sea-ice nomenclature: terminology, codes and illustrated glossary. WMO Publication. Secretary of the World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland. 2014. V. 259 (1). 121 p.
30. *Maqueda M.A., Willmott A.J., Biggs N.R.T.* Polynya dynamics: A review of observations and modelling. *Reviews of Geophysics*. 2004, 42: RG1004. doi: 10.1029/2002RG000116.
31. *Tetzlaff A., Lüpkes C., Birnbaum G., Hartmann J., Nygård T., Vihma T.* Brief Communication: Trends in sea ice extent north of Svalbard and its impact on cold air outbreaks as observed in spring 2013. *The Cryosphere*. 2014, 8 (5): 1757–1762. doi: 10.5194/tc-8-1757-2014.
32. EUMETSAT Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility. Global sea ice concentration reprocessing dataset 1978–2015 [Electronic resource]. Norwegian and Danish Meteorological Institutes. 2015. v1.2 <https://osi-saf.eumetsat.int/products/sea-ice-products> (date of access 10.08.2021) [database].
33. *Hwang B.J., Barber D.G.* Pixel-scale evaluation of SSM/I sea-ice algorithms in the marginal ice zone during early fall freeze-up. *Hydrological Processes*. 2006, 20 (9): 1909–1927.
34. *Goldstein M.A., Lynch A.H., Zsom A., Arbetter T., Chang A., Fetterer F.* The step-like evolution of Arctic open water. *Sci Rep*. 2018, 8 (1): 16902. doi: 10.1038/s41598-018-35064-5.
35. *Ivanov B.V., Sviashchennikov P.N., Urazgil'deeva A.V., Prokhorova U.V., Vesman A.V., Panteleev V.V., Tislenko D.I.* Monthly mean surface air temperature in the Svalbard archipelago according to data from Norwegian and Russian meteorological stations for the period 1898–2014 (SAT) database. Certificate of state registration No. №2016621093 dated 10/08/2016 [database].
36. *Nordli Ø., Przybylak R., Ogilvie A. E., Isaksen K.* Long-term temperature trends and variability on Spitsbergen: the extended Svalbard Airport temperature series, 1898–2012. *Polar Research*. 2014, 33: 21349. <https://doi.org/10.3402/polar.v33.21349>.
37. *Nordli Ø., Wyszynski P., Gjeltén H., Isaksen K., Łupikasa E., Niedźwiedź T., Przybylak R.* Revisiting the extended Svalbard Airport monthly temperature series, and the compiled corresponding daily series 1898–2018. Available at: <http://repozytorium.umk.pl/handle/item/6323> (date of access 01.09.2021).
38. *Gjeltén H.M., Nordli Ø., Isaksen K., Førland E.J., Sviashchennikov P.N., Wyszynski P., Prokhorova U., Przybylak R., Ivanov B.V., Urazgil'deeva A.V.* Air temperature variations and gradients along the coast and fjords of western Spitsbergen. *Polar Research*. 2016, 35 (1): 29878. doi: 10.3402/polar.v35.29878.
39. *Demin V.I., Ivanov B.V., Revina A.D.* Monthly average temperature of the surface air layer (restored series) in the Barentsburg settlement (Spitsbergen archipelago) for the period 1911–2018. (SAT_BBG_II) database. Certificate of state registration No. 2020620164 dated 01/29/2020.
40. *Demin V.I., Ivanov B.V., Revina A.D.* Restoration of the series of surface air temperature at the Russian station “Barentsburg” settlement (Svalbard). *Rossiyskaya Arktika*. Russian Arctic. 2020, 9: 3040. [In Russian].
41. *Hersbach H.* ERA5 monthly averaged data on single levels from 1979 to present [electronic resource] // Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). 2019 <https://doi.org/10.24381/cds.fl7050d7> (date of access 26.08.2021) [database].
42. *Falk-Petersen S., Pavlov V., Berge J., Cottier F., Kovacs K.M., Lydersen C.* At the rainbow's end: high productivity fueled by winter upwelling along an Arctic shelf. *Polar Biology*. 2015, 38 (1): 5–11.
43. *Zubakin G.K.* *Krupnomasshtabnaia izmenchivost' sostoiianiia ledianogo pokrova morei Severo-Evropeiskogo basseina*. Large-scale variability of the state of the ice cover of the seas of the North European basin. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1987: 160 p. [In Russian].
44. *Vesman A.V., Ivanov B.V., Volkov V.A.* Changes in thermohaline system on the west Spitsbergen shelf since 1950 to present time. *Czech Polar Reports*. 2017, 7 (1): 62–73.

ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ
ATMOSPHERE AND HYDROSPHERE PHYSICS

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-2-133-141>
УДК 551.51



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

**Взаимосвязь между площадью и скоростью ветра
по границе антарктического полярного вихря**

В.В. Зуев, Е.С. Савельева*

*Институт мониторинга климатических и экологических систем
Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Россия*

*esav.pv@gmail.com**Резюме**

Одним из условий формирования полярной озоновой аномалии является наличие динамического барьера по границе полярного вихря в зимне-весенний период, существующего при скорости ветра по границе вихря в нижней стратосфере не менее 20 м/с и площади вихря более 10 млн км². Целью данной работы является исследование взаимосвязи между площадью вихря и скоростью ветра по границе вихря на примере антарктического полярного вихря. В работе использовался метод оконтуривания вихрей на основе значений геопотенциала, определенных по максимальным значениям градиента температуры и скорости ветра. Показано, что взаимосвязь между площадью вихря и скоростью ветра по границе вихря прослеживается при значениях площади менее 25 млн км² (положительная корреляция) и более 50 млн км² (отрицательная корреляция).

Ключевые слова: граница вихря, оконтуривание вихрей, площадь вихря, полярные вихри, скорость ветра.

Для цитирования: Зуев В.В., Савельева Е.С. Взаимосвязь между площадью и скоростью ветра по границе антарктического полярного вихря // Проблемы Арктики и Антарктики. 2022. Т. 68. № 2. С. 133–141. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-2-133-141>.

Поступила 29.04.2022

После переработки 31.05.2022

Принята 13.06.2022

**Relationship between area and wind speed along the edge
of the Antarctic polar vortex**

Vladimir V. Zuev, Ekaterina S. Savelieva*

*Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia*

*esav.pv@gmail.com**Summary**

The Antarctic polar vortex forms in autumn, intensifies in the winter-spring period and decays in late spring. Inside the vortex in the lower stratosphere, favorable conditions are created for the annual spring ozone depletion.

One of the conditions for the formation of the Antarctic ozone hole is the presence of a dynamic barrier along the vortex edge in the winter-spring period, which contributes to a decrease in temperature inside the vortex (necessary for the existence of polar stratospheric clouds) and prevents the penetration of air masses into the vortex. The dynamic barrier exists when the wind speed along the vortex edge in the lower stratosphere is at least 20 m/s. When the vortex area decreases below 10 million km², the dynamic barrier usually weakens, preceded by the vortex breakdown. The purpose of this work is to consider the relationship between the vortex area and the wind speed along the vortex edge using the Antarctic polar vortex as an example. To analyze the dynamics of the Antarctic polar vortex, we used a method based on vortex delineation, which makes it possible to calculate the vortex area and wind speed along the vortex edge using geopotential values determined from the maximum values of temperature gradient and wind speed and, thus, characterizing the polar vortex edges. Seasonal variations in the vortex area are mainly determined by the time of the beginning, peak and end of the polar night. In turn, seasonal changes in wind speed along the edge of the Antarctic vortex are additionally determined by the influence of the temperature of the lower subtropical stratosphere. To eliminate the influence of the seasonal variation, polynomial trends were removed from the time series of the parameters considered. We have shown that the relationship between the vortex area and the wind speed along the vortex edge can be traced for area values of less than 25 million km² and more than 50 million km². At small values of the vortex area (< 25 million km²), during its formation and destruction, a positive correlation appears between the vortex area and the wind speed along the vortex edge. At high values of the vortex area (> 50 million km²), a negative correlation can be traced between the parameters studied.

Keywords: polar vortices, vortex area, vortex delineation, vortex edge, wind speed.

For Citation: Zuev V.V., Saveliyeva E.S. Relationship between area and wind speed along the edge of the Antarctic polar vortex. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2022, 68 (2): 133–141. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-2-133-141>.

Received 29.04.2022

Revised 31.05.2022

Accepted 13.06.2022

ВВЕДЕНИЕ

Стратосферные полярные вихри представляют собой крупномасштабные циклоны, распространяющиеся от тропопаузы в мезосферу и существующие с осени по весну [1–3]. Структура и динамика полярных вихрей играет важную роль в распределении стратосферного озона, движении воздушных масс у вихря и температурном режиме над полярной областью [4]. Границы полярного вихря представляют собой динамический барьер, препятствующий меридиональному переносу стратосферного озона из тропических и средних широт в полярную область [5, 6]. При этом внутри полярного вихря при экстремально низких температурах (< –78 °C) формируются полярные стратосферные облака (ПСО), на поверхности и в объеме которых протекают гетерогенные реакции с высвобождением молекулярного хлора. При появлении солнечного излучения над полярным регионом молекулярный хлор фотодиссоциирует с образованием радикалов хлора, вступающих в каталитический цикл разрушения озона [7–11]. Более раннее разрушение полярного вихря происходит в результате проникновения в стратосферу вертикально распространяющихся планетарных волн Россби и сопровождается возникновением внезапных стратосферных потеплений (ВСП) [12–14]. ВСП разделяются на большие и малые. Согласно определению Всемирной метеорологической организации, ВСП можно считать большим, если на высотах от уровня 10 гПа и ниже среднеширотная температура резко возрастает по направлению от 60° широт к полюсу при наблюдаемой смене направления зонального потока в течение нескольких дней/часов [15]. Если при выраженном росте стратосферных температур направление зональных ветров с западного на восточное не меняется, ВСП считается малым. При малых ВСП происходит сильное смещение полярного вихря, а при больших — его расщепление на два небольших вихря [16–18].

Полярный вихрь, со скоростью ветра по границе не менее 20 м/с в нижней стратосфере, характеризуется наличием динамического барьера [19]. При локальном уменьшении скорости ветра по границе вихря ниже 20 м/с в нижней стратосфере наблюдается повышение температуры внутри вихря и, как правило, полное разрушение частиц ПСО [19, 20]. Происходит изменение газового и аэрозольного состава атмосферы внутри вихря вплоть до ее первоначального состояния, когда полярный вихрь только сформировался и еще не содержит продуктов протекания гетерогенных реакций в достаточном количестве для масштабного разрушения озона с появлением солнечного излучения в конце зимы. В отличие от арктического полярного вихря, локальные понижения скорости ветра по границе антарктического вихря ниже 20 м/с крайне редки, в частности в период с июня по октябрь практически не наблюдаются (чаще встречаются в апреле и мае — на этапе формирования вихря и поздней весной). При уменьшении площади полярного вихря ниже 10 млн км² динамический барьер, как правило, ослабляется, предвзя разрушение вихря [21]. Целью данной работы является рассмотрение взаимосвязи между площадью вихря и скоростью ветра по границе вихря на примере антарктического полярного вихря.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для анализа динамики антарктического полярного вихря использовался метод оценки основных параметров вихря (площади вихря и скорости ветра по границе вихря) при оконтуривании его границ [22]. Геопотенциал зависит только от давления и температуры [23] и, таким образом, достаточно точно описывает динамику полярного вихря, поскольку внутри последнего наблюдаются низкие значения температуры и давления, а за его пределами — высокие. Кроме того, геопотенциал не претерпевает значительных сезонных изменений в период существования вихря и, соответственно, хорошо подходит для определения границ полярного вихря. Для определения значений геопотенциала, характеризующих границы антарктического полярного вихря в нижней и средней стратосфере (на уровнях 50 и 10 гПа), использовались данные о скорости зонального и меридионального ветра, температуре воздуха и геопотенциале реанализа ERA5 (<https://doi.org/10.24381/cds.bd0915c6>) [24]. По границе полярного вихря наблюдаются максимальный градиент температуры и, как правило, максимальные значения скорости ветра. На основе ежечасных данных с разрешением $0,25 \times 0,25^\circ$ для уровней 50 и 10 гПа за 1979–2020 гг. были получены следующие значения: температура в точке максимального градиента по широте в диапазоне $40\text{--}90^\circ$ ю. ш., значение геопотенциала в точках максимального градиента температуры, максимальная скорость ветра по широте в диапазоне $40\text{--}90^\circ$ ю. ш. Скорость ветра определялась как векторная сумма зональной и меридиональной скорости. В среднем за 1979–2020 гг. значение геопотенциала Φ^* в районе максимального градиента температуры по границе вихря составило $\Phi^* = (19,30 \pm 0,17) \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{с}^2$ на уровне 50 гПа и $\Phi^* = (29,30 \pm 0,33) \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{с}^2$ на уровне 10 гПа. Таким образом, исследуемые параметры (площадь вихря и скорость ветра у границы вихря) рассчитывались по данным реанализа ERA5, основываясь на том, что граница антарктического полярного вихря на уровнях 50 и 10 гПа определяется значениями геопотенциала соответственно $19,3 \cdot 10^4$ и $29,3 \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{с}^2$.

РЕЗУЛЬТАТЫ, ИХ АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведена плотность диаграмм рассеяния площади антарктического полярного вихря и средней скорости ветра по границе вихря в нижней и средней

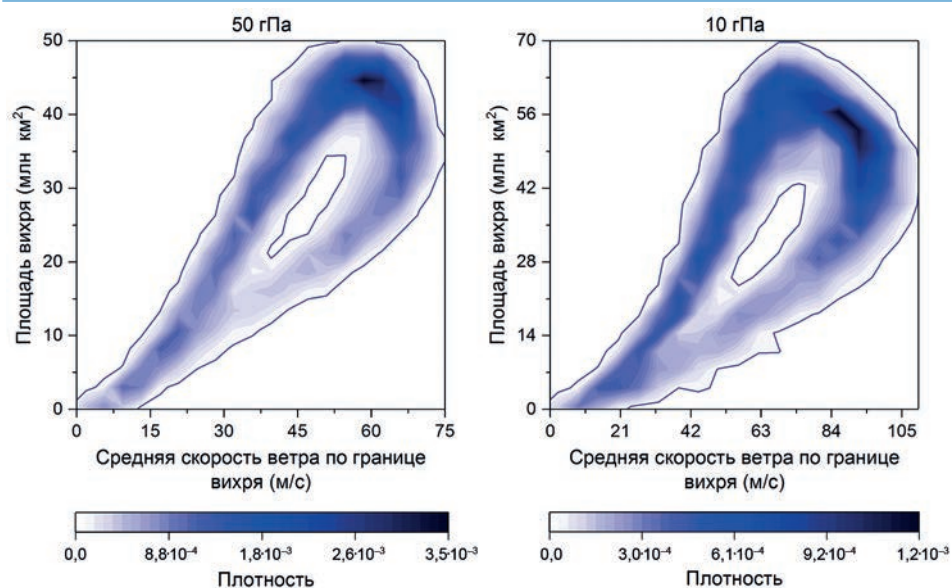


Рис. 1. Графики плотности диаграмм рассеяния среднесуточных значений площади вихря и средней скорости ветра по границе вихря на уровнях 50 и 10 гПа для антарктического полярного вихря за период с 1979 по 2019 г.

Fig. 1. Density plots of scatterplots of the daily mean values of vortex area and mean wind speed along the vortex edge at the 50 and 10 hPa pressure levels for the Antarctic polar vortex from 1979 to 2019

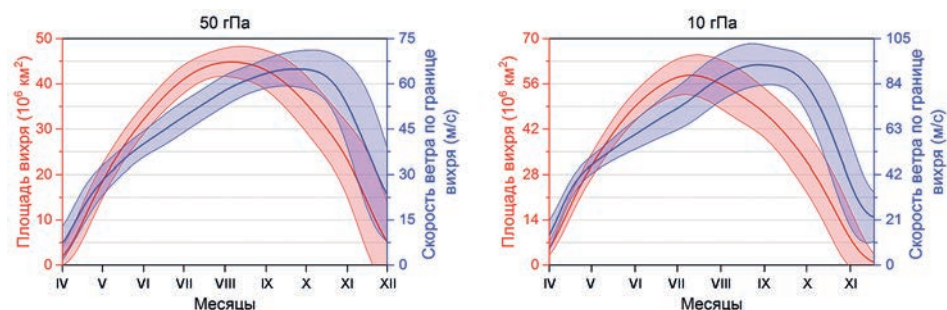


Рис. 2. Внутригодовой ход площади антарктического полярного вихря и средней скорости ветра у границы вихря на уровнях 50 и 10 гПа с апреля по ноябрь в среднем за 1979–2019 гг. с 1,5 СКО

Fig. 2. Seasonal variations of vortex area and mean wind speed along the edge of the Antarctic polar vortex at the 50 and 10 hPa pressure levels from April to November on average over 1979–2019 with 1.5 SD

стратосфере на основе среднесуточных данных, полученных по методу оконтуривания вихря. Диаграммы рассеяния на рис. 1 имеют «петлеобразную» форму и связаны с отличиями в сезонных изменениях рассматриваемых параметров. На рис. 2 приведены 41-летние средние сезонные изменения площади и скорости ветра по границе антарктического полярного вихря в нижней и средней стратосфере со среднеквадратичными отклонениями (1,5 СКО). Межсуточные и межгодовые изменения площади антарктического вихря и средней скорости ветра по границе вихря, как правило, незначительны и находятся (в более 90 % случаях) в пределах 1,5 СКО

относительно многолетнего сезонного хода (рис. 1, 2). Максимальная площадь вихря в нижней и средней стратосфере наблюдается, как правило, в середине зимы, в то время как пик скорости ветра по границе вихря проявляется в весенний период. Сезонные изменения площади стратосферного полярного вихря определяются сроками начала и окончания полярной ночи, которая способствует понижению температуры внутри вихря в нижней и средней стратосфере (в отсутствие солнечного излучения). В свою очередь, ежегодное весеннее увеличение скорости ветра по границе антарктического полярного вихря дополнительно обусловлено влиянием сезонного хода температуры нижней субтропической стратосферы, где в Южном полушарии наблюдается постепенный рост начиная с марта и максимум в сентябре, способствующие увеличению стратосферного меридионального температурного градиента и последующему усилению вихря [25].

Для исследования взаимосвязи между площадью антарктического полярного вихря и средней скоростью ветра по границе вихря из рядов значений рассматриваемых параметров были удалены полиномиальные тренды с целью устранения эффекта ложной корреляции, особенно проявляющегося на этапе формирования и разрушения вихря, когда изменения площади вихря и скорости ветра по границе вихря синхронны и обусловлены влиянием стратосферной циркуляции. Полиномиальные тренды 6-го порядка вычислялись и вычитались из рядов значений рассматриваемых параметров отдельно для каждого года за период с 1979 по 2019 г. Полученные ряды были разделены на 10 групп в зависимости от исходных значений площади вихря (до вычитания полиномиального тренда). В таблице приведены коэффициенты корреляции между среднесуточными значениями площади вихря и средней скорости ветра по границе вихря (полученные на основе рядов, после вычитания полиномиального тренда) на уровнях 50 и 10 гПа для разных диапазонов площади антарктического полярного вихря за 1979–2019 гг. Анализ полученных рядов показал существование взаимосвязи между площадью и скоростью ветра по границе вихря при исходных значениях площади вихря менее 25 млн км² и более 50 млн км² (см. табл. 1; значения выделены жирным шрифтом). На рис. 3, 4 приведены диаграммы рассеяния площади вихря и скорости ветра по границе вихря для диапазонов из таблицы, с наиболее высокими значениями корреляции при значениях

Таблица

Коэффициенты корреляции между среднесуточными значениями площади вихря и средней скорости ветра по границе вихря на уровнях 50 и 10 гПа для разных диапазонов площади антарктического полярного вихря за 1979–2019 гг.

Table

Correlation coefficients between the daily average values of vortex area and average wind speed along the vortex edge at the 50 and 10 hPa pressure levels for different ranges of the Antarctic polar vortex area for the period 1979–2019

Диапазон изменения площади вихря на уровне 50 гПа (млн км ²)									
(0–5]	(5–10]	(10–15]	(15–20]	(20–25]	(25–30]	(30–35]	(35–40]	(40–45]	(45–50]
0,75	0,74	0,72	0,68	0,62	0,40	0,14	0,06	–0,10	–0,25
Диапазон изменения площади вихря на уровне 10 гПа (млн км ²)									
(0–7]	(7–14]	(14–21]	(21–28]	(28–35]	(35–42]	(42–49]	(49–56]	(56–63]	(63–70]
0,74	0,70	0,54	0,46	0,31	–0,29	–0,55	–0,67	–0,75	–0,78

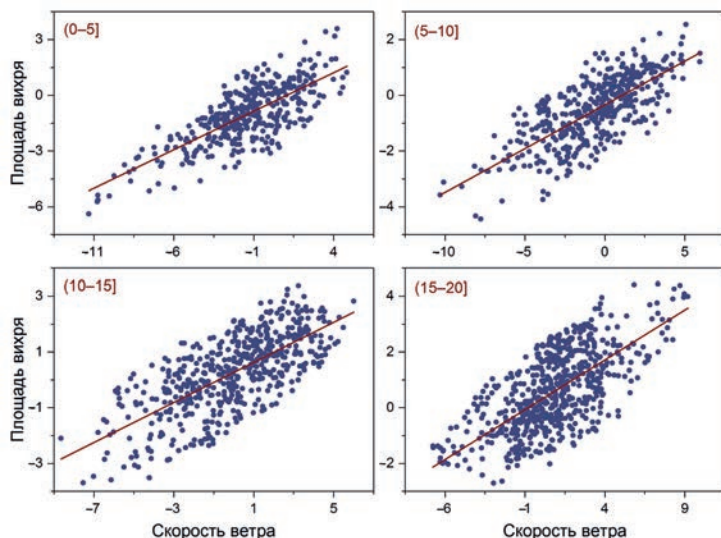


Рис. 3. Диаграммы рассеяния среднесуточных значений площади антарктического полярного вихря и средней скорости ветра по границе вихря на уровне 50 гПа за период с 1979 по 2019 г. для следующих диапазонов площади вихря (млн км²): (0–5], (5–10], (10–15] и (15–20]

Fig. 3. Scatterplots of the daily mean values of vortex area and mean wind speed along the edge of the Antarctic polar vortex at the 50 hPa pressure level from 1979 to 2019 for the following ranges of vortex area (million km²): (0–5], (5–10], (10–15] and (15–20]

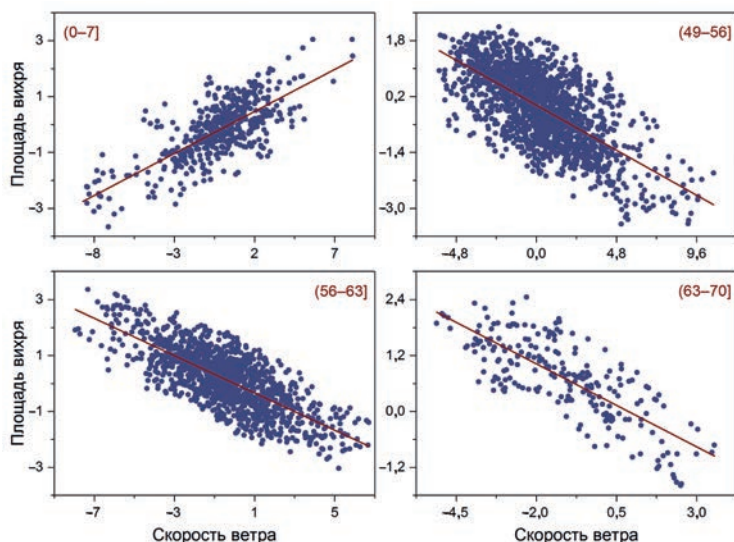


Рис. 4. Диаграммы рассеяния среднесуточных значений площади антарктического полярного вихря и средней скорости ветра по границе вихря на уровне 10 гПа за период с 1979 по 2019 г. для следующих диапазонов площади вихря (млн км²): (0–7], (49–56], (56–63] и (63–70]

Fig. 4. Scatterplots of the daily mean values of vortex area and mean wind speed along the edge of the Antarctic polar vortex at the 10 hPa pressure level from 1979 to 2019 for the following ranges of vortex area (million km²): (0–7], (49–56], (56–63] and (63–70]

площади вихря менее 25 млн км² и более 50 млн км². При площади вихря менее 25 млн км² наблюдаются синхронные изменения площади вихря и скорости ветра по границе вихря (рис. 3, 4). При площади вихря более 50 млн км² при уменьшении (увеличении) площади вихря наблюдается увеличение (уменьшение) скорости ветра по границе вихря (в средней стратосфере, рис. 4).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрена взаимосвязь между площадью вихря и скоростью ветра по границе антарктического полярного вихря. Для устранения влияния сезонного хода из рядов рассматриваемых параметров были удалены полиномиальные тренды. Показано, что взаимосвязь между площадью вихря и скоростью ветра по границе вихря прослеживается при значениях площади менее 25 млн км² и более 50 млн км². При небольших значениях площади вихря (< 25 млн км²), на этапе его формирования и разрушения, проявляется положительная корреляция между площадью вихря и скоростью ветра по границе вихря. При высоких значениях площади вихря (> 50 млн км²) между исследуемыми параметрами прослеживается отрицательная корреляция.

Конфликт интересов. Конфликт интересов отсутствует.

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-00002, <https://rscf.ru/project/22-27-00002>.

Competing interests. The authors have no competing interests.

Funding. This study was supported by the Russian Science Foundation (project No. 22-27-00002, <https://rscf.ru/en/project/22-27-00002/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Waugh D.W., Randel W.J. Climatology of Arctic and Antarctic polar vortices using elliptical diagnostics // J. Atmos. Sci. 1999. V. 56. № 11. P. 1594–1613.
2. Waugh D.W., Polvani L.M. Stratospheric polar vortices // The Stratosphere: Dynamics, Transport, and Chemistry. Geophysical Monograph Series. 2010. V. 190. P. 43–57.
3. Waugh D.W., Sobel A.H., Polvani L.M. What is the polar vortex and how does it influence weather? // Bull. Amer. Meteor. Soc. 2017. V. 98. № 1. P. 37–44.
4. Newman P.A. Chemistry and dynamics of the Antarctic ozone hole // The Stratosphere: Dynamics, Transport, and Chemistry. Geophysical Monograph Series. 2010. V. 190. P. 157–171.
5. Manney G.L., Zurek R.W. On the motion of air through the stratospheric polar vortex // J. Atmos. Sci. 1994. V. 51. № 20. P. 2973–2994.
6. Sobel A.H., Plumb R.A., Waugh D.W. Methods of calculating transport across the polar vortex edge // J. Atmos. Sci. 1997. V. 54. № 18. P. 2241–2260.
7. Solomon S., Garcia R.R., Rowland F.S., Wuebbles D.J. On the depletion of Antarctic ozone // Nature. 1986. V. 321. P. 755–758.
8. Solomon S. Stratospheric ozone depletion: a review of concepts and history // Rev. Geophys. 1999. V. 37. № 3. P. 275–316.
9. Solomon S., Portmann R.W., Sasaki T., Hofmann D.J., Thompson D.W.J. Four decades of ozonesonde measurements over Antarctica // J. Geophys. Res. 2005. V. 110. № 21. P. D21311.
10. Finlayson-Pitts B.J., Pitts J.N. Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere: Theory, Experiments, and Applications. California: Academic Press, 2000. 969 p.
11. Newman P.A., Kawa S.R., Nash E.R. On the size of the Antarctic ozone hole // Geophys. Res. Lett. 2004. V. 31. № 21. P. L21104.

12. Charlton A.J., Polvani L.M. A new look at stratospheric sudden warmings. Part I: Climatology and modeling benchmarks // *J. Climate*. 2007. V. 20. № 3. P. 449–469.
13. Charlton A.J., Polvani L.M., Perlwitz J., Sassi F., Manzini E., Shibata K., Pawson S., Nielsen J.E., Rind D. A new look at stratospheric sudden warmings. Part II: Evaluation of numerical model simulations // *J. Climate*. 2007. V. 20. № 3. P. 470–488.
14. Matthewman N.J., Esler J.G., Charlton-Perez A.J., Polvani L.M. A new look at stratospheric sudden warmings. Part III: Polar vortex evolution and vertical structure // *J. Climate*. 2009. V. 22. № 6. P. 1566–1585.
15. Abridged final report of the seventh session of the commission for atmospheric sciences, Manila, 27 February — 10 March 1978. WMO Rep. 509. Geneva: WMO, 1978. 113 p.
16. Flury T., Hocke K., Haefele A., Kämpfer N., Lehmann R. Ozone depletion, water vapor increase, and PSC generation at midlatitudes by the 2008 major stratospheric warming // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. № 18. P. D18302.
17. Plumb R.A. Planetary waves and the extratropical winter stratosphere // *The Stratosphere: Dynamics, Transport, and Chemistry. Geophysical Monograph Series*. 2010. V. 190. P. 23–41.
18. Kuttippurath J., Nikulin G. A comparative study of the major sudden stratospheric warmings in the Arctic winters 2003/2004–2009/2010 // *Atmos. Chem. Phys.* 2012. V. 12. № 17. P. 8115–8129.
19. Zuev V.V., Savelieva E. Arctic polar vortex dynamics during winter 2006/2007 // *Polar Sci.* 2020. V. 25. P. 100532.
20. Zuev V.V., Savelieva E. Sensitivity of polar stratospheric clouds to the Arctic polar vortex weakening in the lower stratosphere in midwinter // *Proc. SPIE*. 2021. V. 11916. P. 1191674.
21. Zuev V.V., Savelieva E.S., Pavlinsky A.V. Features of stratospheric polar vortex weakening prior to breakdown // *Atmos. Ocean. Opt.* 2022. V. 35. № 2. P. 183–186.
22. Zuev V.V., Savelieva E. Antarctic polar vortex dynamics during spring 2002 // *J. Earth Syst. Sci.* 2022. V. 131. № 2. P. 119.
23. Holton J. *An Introduction to Dynamic Meteorology*. 4th Edition. California: Academic Press, 2004. 535 p.
24. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biavati G., Bidlot J., Bonavita M., de Chiara G., Dahlgren P., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hogan R.J., Hólm E., Janisková M., Keeley S., Lalouaux P., Lopez P., Lupu C., Radnoti G., de Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Villaume S., Thépaut J.-N. The ERA5 global reanalysis // *Q. J. Roy. Meteor. Soc.* 2020. V. 146. № 729. P. 1–51.
25. Zuev V.V., Savelieva E. The cause of the spring strengthening of the Antarctic polar vortex // *Dynam. Atmos. Oceans*. 2019. V. 87. P. 101097.

REFERENCES

1. Waugh D.W., Randel W.J. Climatology of Arctic and Antarctic polar vortices using elliptical diagnostics. *J. Atmos. Sci.* 1999, 56 (11): 1594–1613.
2. Waugh D.W., Polvani L.M. Stratospheric polar vortices. *The Stratosphere: Dynamics, Transport, and Chemistry. Geophysical Monograph Series*. 2010, 190: 43–57.
3. Waugh D.W., Sobel A.H., Polvani L.M. What is the polar vortex and how does it influence weather? *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2017, 98 (1): 37–44.
4. Newman P.A. Chemistry and dynamics of the Antarctic ozone hole. *The Stratosphere: Dynamics, Transport, and Chemistry. Geophysical Monograph Series*. 2010, 190: 157–171.
5. Manney G.L., Zurek R.W. On the motion of air through the stratospheric polar vortex. *J. Atmos. Sci.* 1994, 51 (20): 2973–2994.

6. *Sobel A.H., Plumb R.A., Waugh D.W.* Methods of calculating transport across the polar vortex edge. *J. Atmos. Sci.* 1997, 54 (18): 2241–2260.
7. *Solomon S., Garcia R.R., Rowland F.S., Wuebbles D.J.* On the depletion of Antarctic ozone. *Nature.* 1986, 321: 755–758.
8. *Solomon S.* Stratospheric ozone depletion: a review of concepts and history. *Rev. Geophys.* 1999, 37 (3): 275–316.
9. *Solomon S., Portmann R.W., Sasaki T., Hofmann D.J., Thompson D.W.J.* Four decades of ozonesonde measurements over Antarctica. *J. Geophys. Res.* 2005, 110 (21): D21311.
10. *Finlayson-Pitts B.J., Pitts J.N.* Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere: Theory, Experiments, and Applications. California: Academic Press, 2000: 969 p.
11. *Newman P.A., Kawa S.R., Nash E.R.* On the size of the Antarctic ozone hole. *Geophys. Res. Lett.* 2004, 31 (21): L21104.
12. *Charlton A.J., Polvani L.M.* A new look at stratospheric sudden warmings. Part I: Climatology and modeling benchmarks. *J. Climate.* 2007, 20 (3): 449–469.
13. *Charlton A.J., Polvani L.M., Perlwitz J., Sassi F., Manzini E., Shibata K., Pawson S., Nielsen J.E., Rind D.* A new look at stratospheric sudden warmings. Part II: Evaluation of numerical model simulations. *J. Climate.* 2007, 20 (3): 470–488.
14. *Matthewman N.J., Esler J.G., Charlton-Perez A.J., Polvani L.M.* A new look at stratospheric sudden warmings. Part III: Polar vortex evolution and vertical structure. *J. Climate.* 2009, 22 (6): 1566–1585.
15. Abridged final report of the seventh session of the commission for atmospheric sciences, Manila, 27 February — 10 March 1978. WMO Rep. 509. Geneva: WMO, 1978: 113 p.
16. *Flury T., Hocke K., Haefele A., Kämpfer N., Lehmann R.* Ozone depletion, water vapor increase, and PSC generation at midlatitudes by the 2008 major stratospheric warming. *J. Geophys. Res.* 2009, 114 (18): D18302.
17. *Plumb R.A.* Planetary waves and the extratropical winter stratosphere. *The Stratosphere: Dynamics, Transport, and Chemistry. Geophysical Monograph Series.* 2010, 190: 23–41.
18. *Kuttippurath J., Nikulin G.* A comparative study of the major sudden stratospheric warmings in the Arctic winters 2003/2004–2009/2010. *Atmos. Chem. Phys.* 2012, 12 (17): 8115–8129.
19. *Zuev V.V., Savelieva E.* Arctic polar vortex dynamics during winter 2006/2007. *Polar Sci.* 2020, 25: 100532.
20. *Zuev V.V., Savelieva E.* Sensitivity of polar stratospheric clouds to the Arctic polar vortex weakening in the lower stratosphere in midwinter. *Proc. SPIE.* 2021, 11916: 1191674.
21. *Zuev V.V., Savelieva E.S., Pavlinsky A.V.* Features of stratospheric polar vortex weakening prior to breakdown. *Atmos. Ocean. Opt.* 2022, 35 (2): 183–186.
22. *Zuev V.V., Savelieva E.* Antarctic polar vortex dynamics during spring 2002. *J. Earth Syst. Sci.* 2022, 131 (2): 119.
23. *Holton J.* An Introduction to Dynamic Meteorology. 4th Edition. California: Academic Press, 2004: 535 p.
24. *Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biavati G., Bidlot J., Bonavita M., de Chiara G., Dahlgren P., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hogan R.J., Hólm E., Janisková M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez P., Lupu C., Radnoti G., de Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Villaume S., Thépaut J.-N.* The ERA5 global reanalysis. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.* 2020, 146 (729): 1–51.
25. *Zuev V.V., Savelieva E.* The cause of the spring strengthening of the Antarctic polar vortex. *Dynam. Atmos. Oceans.* 2019, 87: 101097.

МЕТЕОРОЛОГИЯ И КЛИМАТОЛОГИЯ METEOROLOGY AND CLIMATOLOGY

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-2-142-159>
УДК 551.583



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

Анализ трендов климатических показателей по данным наземных метеонаблюдений и реанализа на Земле Эндерби, Восточная Антарктика

С.В. Саливончик, С.В. Какарека*

Государственное научное учреждение «Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси», Минск, Республика Беларусь

**salivonchik@yahoo.co.uk*

Резюме

В работе исследуются наличие и направленность климатических изменений на Земле Эндерби, Восточная Антарктика, где с 1963 по 1999 г. на научной станции Молодежная (сейчас летняя полевая база РАЭ) функционировала единственная метеорологическая станция сети ВМО, а в настоящее время установлена автоматическая метеорологическая станция.

Проанализированы тренды температуры приземного слоя воздуха, скорости и направления ветра за период с середины 1960-х гг. по настоящее время. В качестве исходных данных использованы результаты наземных наблюдений на станции Молодежная, а также ряды реанализа, которые позволили восполнить инструментальные ряды и оценить динамику характеристик температуры и ветра для последних десятилетий.

В качестве исходных использовались месячные значения климатических параметров, но для характеристик ветра, представленных в виде V и U компонент вектора скорости, брались срочные значения, по которым оценивались среднемесячные значения скоростей и распределения ветра по направлениям.

Из различных систем реанализа путем сопоставления с наземными наблюдениями были выбраны ряды, которые показали наибольшее сходство в динамике исследуемых климатических характеристик. Отмечено хорошее согласование температурных рядов наблюдения на метеостанции Молодежная с рядами реанализа UDel_AirT, ERA5 и GISS. Связь между рядами наблюдений ветра менее тесная, несколько лучше динамику скорости ветра передают ряды реанализа ERA5.

По анализу многолетней динамики среднегодовых и среднемесячных температур в районе Земли Эндерби тенденция к потеплению статистически не подтверждена, тем не менее отмечено постепенное увеличение количества месяцев в году с положительной динамикой температуры. Из анализа характеристик ветра статистически значимым признан лишь рост среднегодовой скорости ветра с интенсивностью 0,1–0,3 м/с/10 лет.

Ключевые слова: Антарктика, климатические тренды, ряды реанализа, скорость и направление ветра, станция Молодежная, температура воздуха.

Для цитирования: Саливончик С.В., Какарека С.В. Анализ трендов климатических показателей по данным наземных метеонаблюдений и реанализа на Земле Эндерби, Восточная Антарктика // Проблемы Арктики и Антарктики. 2022. Т. 68. № 2. С. 142–159. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-2-142-159>.

Поступила 29.04.2022

После переработки 14.06.2022

Принята 16.06.2022

Analysis of trends of meteoroclimatic characteristics at Enderby Land, East Antarctica based on land observations data and reanalysis

Svetlana V. Salivonchyk*, Sergey V. Kakareka

*Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Belarus*

*salivonchyk@yahoo.co.uk

Summary

The article studies the presence and possible direction of climate change in Enderby Land, East Antarctica, where from 1963 to 1999, the only meteorological station of the WMO network operated at the Molodezhnaya research station (now the summer field base of the RAE), and now an automatic meteorological station has been installed.

The trends in surface air temperature, wind speed and direction for the period from the mid-1960s to the present have been analyzed. As initial data, we used the results of ground-based observations at the Molodezhnaya station, as well as reanalysis datasets, which made it possible to complete the instrumental series and evaluate the dynamics of temperature and wind characteristics for the last decades.

Monthly values of climatic parameters were used as initial values, but for wind characteristics presented as the V and U components of the speed vector, single values were taken, according to which the average monthly wind speeds and wind distributions in directions were estimated.

From different reanalysis systems, by comparison with ground-based observations, series were selected that showed the greatest similarity in the dynamics of the climatic characteristics studied. Good agreement was found between the temperature series of observations at the Molodezhnaya meteorological station and the datasets UDEL_AirT, ERA5, and GISS. The correlation between the wind observation series is less strong; ERA5 reanalysis data shows the wind speed dynamics slightly better.

According to the analysis of the long-term dynamics of average annual and monthly temperatures in the region of Enderby Land, the warming trend has not been statistically confirmed, however, a progressive increase in the number of months of the year with positive temperature dynamics has been noted. Based on the analysis of wind characteristics, it is shown that only an increase in average annual wind speeds of 0.1–0.3 m/s/10 years is statistically significant.

Keywords: Antarctica, air temperature, climate trends, Molodezhnaya station, reanalysis, wind speed and direction.

For Citation: Salivonchyk S.V., Kakareka S.V. Analysis of trends of meteoroclimatic characteristics at Enderby Land, East Antarctica based on land observations data and reanalysis. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2022, 68 (2): 142–159. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-2-142-159>.

Received 29.04.2022

Revised 14.06.2022

Accepted 16.06.2022

ВВЕДЕНИЕ

Проблема климатических изменений в Антарктическом регионе в последнее время вызывает серьезную обеспокоенность мирового сообщества и стала предметом рассмотрения в ряде крупных работ, обзоров, докладов, в частности Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) [1–6 и др.].

Согласно выводам [3], климат высоких широт более изменчив в сравнении с тропическими или средними, и за последние несколько миллионов лет он значительно менялся под воздействием широкого спектра условий. При этом отделить естественную изменчивость климата от антропогенных воздействий чрезвычайно сложно, так как период инструментальных наблюдений короток по сравнению с историей континента. По мнению [7], некоторые части Антарктиды сталкиваются с самыми быстрыми темпами изменения климата на планете, но наблюдаемые в Антарктике уровни антропогенных изменений невелики по сравнению с естественными масштабами динамических

процессов, и поэтому их сложно вычлениить. Чаще всего наблюдаемая в последние десятилетия динамика объясняется изменениями циркумполярного вихря Южного полушария и усилением летом и осенью западных ветров, которые связаны с падением давления вдоль побережья Антарктики и его ростом в средних широтах [1, 8].

Отмечается, что потепление на континенте в последние десятилетия все более очевидно, но в первую очередь касается Западной Антарктики. В восточной части континента скорость климатических изменений существенно ниже [9, 10]. Об этом свидетельствуют и регулярно обновляемые данные Национального центра данных по снегу и льду, содержащие сведения и многолетние обобщения по площадям и другим характеристикам морского и континентального льда (<https://nsidc.org/data/>). Однако все чаще стала появляться информация об изменениях, затрагивающих восточную часть региона. Так, сообщается о быстром отступлении морского льда у берегов Восточной Антарктиды, которое приводит к потеплению поверхности у побережья [11], о возрастании сухости в регионе, о которой свидетельствуют изменения в растительности [12]. В то же время другие данные говорят о приросте ледяной массы в отдельных частях Восточной Антарктики [13, 14].

Целью данного исследования является анализ наличия и направленности климатических изменений на Земле Эндерби. Земля Эндерби — часть Восточной Антарктики, прибрежная часть которой простирается от ледника Шиннан (67° 55' ю. ш. 44° 38' в. д.) до залива Уильяма Скорсби (67° 55' ю. ш. 44° 38' в. д.) [15]. На этой территории вдоль побережья имеются 7 антарктических оазисов — участков суши, свободных ото льда, общей площадью более 100 км². На двух из них, Молодежный и Вечерний, объединяемых общим названием оазис Холмы Тала, с 1962 г. функционировала научная станция Молодежная. В оазисе Вечерний с конца 1970-х гг. располагалась полевая база для обслуживания аэродрома, а с декабря 2007 г. начала базироваться Белорусская сезонная антарктическая экспедиция (БАЭ).

Анализ динамики современных климатических показателей для этой территории ранее выполнялся в основном по данным наземных наблюдений. В настоящее время имеется несколько региональных обобщений, включающих описание этого района по изменению температуры и давления [1], средней скорости и частоты возникновения сильных ветров [16], параметров ветра в мезосфере / нижней термосфере [17] и пр.

По дистанционным данным в целом для Антарктики и ее отдельных регионов проанализированы тренды температуры [18] и скорости ветра [19]. Однако район Земли Эндерби в них детально не рассматривается. Специальные исследования на этой территории на основе данных реанализа не выполнялись.

Имеющиеся ряды наземных метеорологических наблюдений для исследуемой территории являются недостаточно полными. В районе Земли Эндерби расположена одна метеорологическая станция сети ВМО Молодежная (индекс 89542), которая на протяжении длительного периода являлась главной базой Советской антарктической экспедиции. Ближайшими к ней постоянными станциями из числа функционирующих являются Syowa (Япония) и Mawson (Австралия), удаленные соответственно на 297,9 км и 718,9 км, а также автоматические станции Relay Station (UW/Japan) и Amery (Австралия), расположенные на расстоянии 714,8 и 1004,1 км (<http://weather.gladstonefamily.net/site/89542>).

Систематические круглогодичные научные наблюдения на станции Молодежная выполнялись с января 1963 по июнь 1999 г., после чего она на длительный период была законсервирована. После перерыва Молодежная возобновила работу в качестве летней полевой базы РАЭ, на ней была установлена автоматическая метеорологическая станция (АМС) модели MAWS110 (Vaisala HydroMet™). В 2012 г. в районе базирования Белорусской антарктической экспедиции на горе Вечерняя также была

установлена АМС М-49М, которая работает только в летний сезон. Некоторое время АМС работала нестабильно, и первые данные были получены только в 2010 г., а относительно полный годовой ряд наблюдений — начиная с 2018 г.

Учитывая значительные пробелы в рядах наземных наблюдений за последние десятилетия, для анализа климатических изменений представляется целесообразным использовать ряды реанализа, которые являются результатом обобщения и обработки всех доступных метеорологических наблюдений с различных источников (данные станций ВМО и станций радиозондирования, спутниковые наблюдения, сводки воздушных и морских судов и т. д.) с использованием единой последовательной схемы/модели ассимиляции. Современные ряды реанализа позволяют существенно восполнить недостаток метеорологической информации для Земли Эндерби.

Предметом рассмотрения стали следующие климатические характеристики: температура приземного слоя воздуха, скорость и направление ветра. Задачи исследования включали: сопоставление данных различных систем реанализа с результатами инструментальных наблюдений на станции Молодежная; выявление рядов, наиболее согласованных по динамике исследуемых переменных; анализ их трендов за период с середины 1960-х гг. до настоящего времени.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Для решения поставленных задач использовались массивы данных наземных наблюдений на станции Молодежная и различные модельные данные: ряды реанализа Национального центра прогноза окружающей среды США NCEP/NCAR Reanalysis 1 (<https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>) и NCEP-DOE Reanalysis 2 (<https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis2.html>), исторические ряды NOAA-CIRES 20th Century Reanalysis (20CR) (https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.20thC_ReanV3.html), ряды Европейского центра среднесрочных прогнозов ERA5 (<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>), данные реанализа Университета штата Делавэр UDel_AirT (https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.UDel_AirT_Precip.html) и анализа температуры поверхности Земли Института космических исследований НАСА имени Годдарда (GISS surface temperature analysis) (<https://data.giss.nasa.gov/gistemp/>). Характеристики рядов приведены в таблице 1.

Анализировались данные месячного разрешения; по характеристикам ветра, которые для некоторых рядов представлены в виде V и U компонент вектора скорости, в качестве исходных использовались срочные значения. Для них первоначально были рассчитаны скорости и направления ветра и лишь затем получены среднемесячные осреднения.

Температурные ряды из системы реанализа NOAA-CIRES 20th Century были получены по последней версии 3 (20CRv3), а скорости ветра — по версии 2c (20CRv2c), где этот показатель представлен с месячным осреднением. Оценки среднемесячных скоростей по более поздней версии показали значимые различия между данными до 1981 г. и после, рассчитывавшимися по разным вариациям одной версии модели (3si и 3mo).

Данные наземных наблюдений на станции Молодежная получены из каталога данных Арктического и антарктического научно-исследовательского института Государственного научного центра Российской Федерации (<http://www.aari.aq>), где они представлены в виде среднемесячных значений метеорологических параметров. Некоторая часть информации наземных измерений, например по характеристикам ветра, получена из глобальной интегрированной базы данных ежечасных синоптических приземных наблюдений (ISD), доступ к которой предоставлен через FTP-сервер

Таблица 1

Table 1

Характеристика анализируемых в работе рядов реанализа для Земли Эндерби

Characteristics of the data of some reanalysis series for Enderby Land used in the work

Тип реанализа	Разрешение сетки	Полный временной ряд	Ближайшая точка сетки, дес. градус	Данные	Единица измерения	Уровень	Временное разделение
UDEL_AirT V5.01	0,5°×0,5°	1900–2017	S67,75 E45,75	Температура воздуха	°C	поверхностный слой	месяц
NCEP/NCAR 1	2,5°×2,5°	1948 — по наст. вр.	S67,50 E45,00	Температура воздуха на уровне значимости $\sigma = 0,995$	°C	поверхностный слой	месяц
	Gaussian grid	1948 — по наст. вр.	S67,6171 E45,00	U компонента вектора скорости ветра (u-wind)	м/с	10 м	4 раза в сутки
				V компонента вектора скорости ветра (v-wind)	м/с	10 м	4 раза в сутки
				Температура воздуха	К	2 м	месяц
ERA5	Global T62 Gaussian grid	1979 — по наст. вр.	S67,6171 E45,00	U компонента вектора скорости ветра (u-wind)	м/с	10 м	4 раза в день
				V компонента вектора скорости ветра (v-wind)	м/с	10 м	4 раза в день
	0,5°×0,5°	1979 — по наст. вр.	S67,75 E45,75	Температура воздуха	К	2 м	месяц
				Скорость ветра	м/с	10 м	месяц
20CRv3				U компонента вектора скорости ветра (u-wind)	м/с	10 м	1 час
				V компонента вектора скорости ветра (v-wind)	м/с	10 м	1 час
	1°×1°	1836–2015	S67,00 E46,00	Температура воздуха	К	2 м	месяц
	Global T62 Gaussian grid	1851–2014	S67,6171 E45,00	Скорость ветра	м/с	10 м	месяц
GISS	2,0°×2,0°	1880 — по наст. вр.	S67,00 E45,00	Аномалии температур, сглаженные окном 250 км	°C	поверхностный слой	месяц

Национального управления океанических и атмосферных исследований США (<ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/noaa>).

Данные метеонаблюдений на станции Вечерняя использовались фрагментарно.

Предполагалось выводы о тенденциях изменения климатических показателей делать на основании не всех имеющихся рядов реанализа, а только максимально совпадающих с инструментальными рядами станции Молодежная. Выбор таких данных производился путем сопоставления хода среднемесячных и среднегодовых значений параметров.

Данные реанализа, как правило, распределены по регулярной сетке и описывают значения параметров в ее узлах. Пространственное разрешение, а также временной шаг и охват рядов отличаются (см. табл. 1). По каждому типу данных реанализа отбирался временной ряд значений для узла, расположенного ближе всего к станции Молодежная. Так как площади антарктических оазисов небольшие, а условия за их пределами существенно отличаются, то расстояние в несколько десятков километров может существенно сказаться на климатических характеристиках. Поэтому отклонения в абсолютных значениях рядов для разных точек считались допустимыми и большее внимание при выборе уделялось сопряженности временного хода.

Наиболее близкие к условиям станции Молодежная ряды реанализа анализировались на предмет наличия трендов, количества положительных и отрицательных аномалий, сравнивались их средние значения и экстремумы. Рассматривались тенденции, характерные как для отдельных точек, так и для всего района исследования, по совокупности рядов для множества узлов сетки.

В связи с разным временным охватом рядов наблюдения весь обеспеченный данными период был разделен на три последовательных, одинаковых по продолжительности (20 лет) и частично пересекающихся временных отрезка: 1964–1983, 1979–1998, 1998–2017. Они выделены с учетом срока начала наземных метеорологических наблюдений в исследуемом районе и разделены таким образом, чтобы были обеспечены наибольшим количеством рядов наблюдений, ни один из которых на протяжении обозначенного отрезка времени не прерывался. Для каждого из выделенных периодов расчеты линейного тренда выполнялись стандартным методом.

Дополнительно параметры тренда оценивались методом многократного скользящего выравнивания, который позволяет избежать влияния значений на концах временных рядов [20]. В этом случае линейные коэффициенты тренда определялись для полных рядов, без деления на отрезки; при сглаживании использовалась длина базы 15 лет. Значимость трендов оценивалась с использованием t-критерия Стьюдента.

Аномалии рядов оценивались относительно среднегодовых норм каждого ряда в отдельности, за исключением данных реанализа GISS, которые изначально являются рядами температурных аномалий. Для выполнения тренд-анализа температурные ряды GISS преобразовались к абсолютным значениям с использованием месячных норм для ст. Молодежная.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнение рядов реанализа с данными инструментальных наблюдений на станции Молодежная

Результаты корреляционного анализа показали, что все сравниваемые температурные ряды хорошо согласуются с данными инструментальных наблюдений

на метеорологической станции Молодежная, наибольшее сходство было отмечено для рядов UDEL_AirT V5.01, GISS и ERA5 (табл. 2, рис. 1). В выбранном перечне температурные ряды ERA5 показали наиболее существенные различия в средних значениях, но по согласованности многолетнего хода температуры наиболее близки к инструментальному ряду, поэтому были приняты к рассмотрению.

Таблица 2

Коэффициенты корреляции для приземной температуры воздуха и скорости ветра между данными стационарных наблюдений на станции Молодежная и рядами реанализа

Table 2

Correlation coefficients for surface air temperatures and wind speeds between stationary observations at the Molodezhnaya station and reanalysis series

Ряд данных	Температура воздуха, °C		Скорость ветра, м/с	
	среднемесечная	среднегодовая	среднемесечная	среднегодовая
UDEL_AirT V5.01	0,997 (n = 437)	0,972 (n = 35)		
NCEP/NCAR 1	0,962 (n = 246)	0,593 (n = 35)	0,801 (n = 433)	0,222 (n = 33)
NCEP-DOE 2*	0,987 (n = 246)	0,762 (n = 20)	0,814 (n = 245)	0,177 (n = 19)
ERA5*	0,997 (n = 437)	0,935 (n = 20)	0,936 (n = 245)	0,507 (n = 19)
20CRv2			0,790 (n = 433)	0,165 (n = 33)
20CRv3*	0,981 (n = 437)	0,732 (n = 35)		
GISS**	0,998 (n = 437)	0,963 (n = 35)		

n — длина отрезка времени сравниваемой пары рядов, месяцев для среднемесечных значений и лет — для среднегодовых; * — температурные ряды были пересчитаны в °C; ** — GISS ряды преобразованы с учетом месячных норм для ст. Молодежная

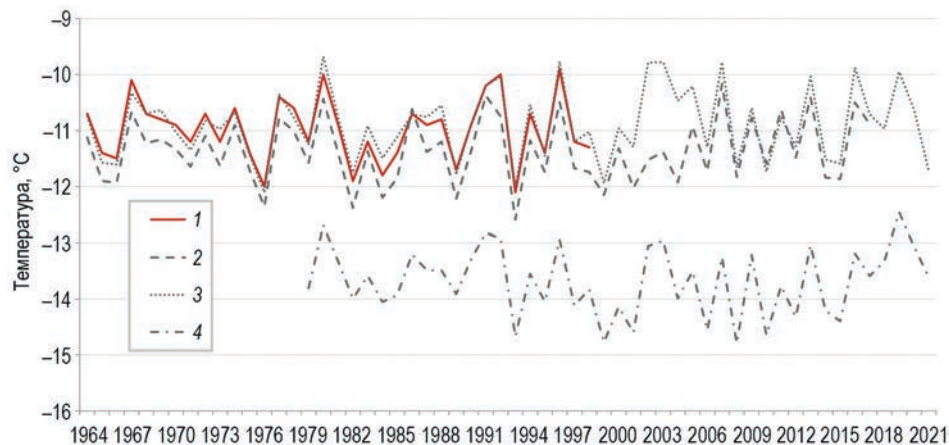


Рис. 1. Изменение среднегодовой температуры приземного воздуха по данным инструментальных наблюдений на станции Молодежная и рядам реанализа для ближайших к станции узлов сетки: 1 — ст. Молодежная; 2 — UDEL_AirT V5.01; 3 — GISS; 4 — ERA5.

Температурные ряды GISS преобразованы с учетом рассчитанных месячных норм для ст. Молодежная

Fig. 1. Changes in mean annual surface air temperatures according to instrumental observations at the Molodezhnaya station and reanalysis series for grid nodes closest to the station: 1 — Molodezhnaya station; 2 — UDEL_AirT V5.01; 3 — GISS; 4 — ERA5.

Temperature series GISS are converted taking into account monthly norms for the Molodezhnaya station

По характеристикам скоростей ветра выявляются более значимые различия между рядами данных. Если при сопоставлении среднемесячных значений было отмечено удовлетворительное согласование всех анализируемых рядов реанализа, то при оценке среднегодовых скоростей ветра достоверность связи (при уровне значимости $p = 0,05$) была подтверждена только для рядов ERA5 (см. табл. 2). Но в то же время для этих рядов выявлены заниженные среднегодовые значения скоростей ветра по сравнению с данными ст. Молодежная, так же как и для рядов NCEP/NCAR 1 и 20CRv2 (рис. 2). Наиболее близкие средние многолетние значения скоростей ветра получены по данным NCEP-DOE 2, которые оценены за период 1979–2021 гг. в $10,8 \pm 0,09$ м/с.

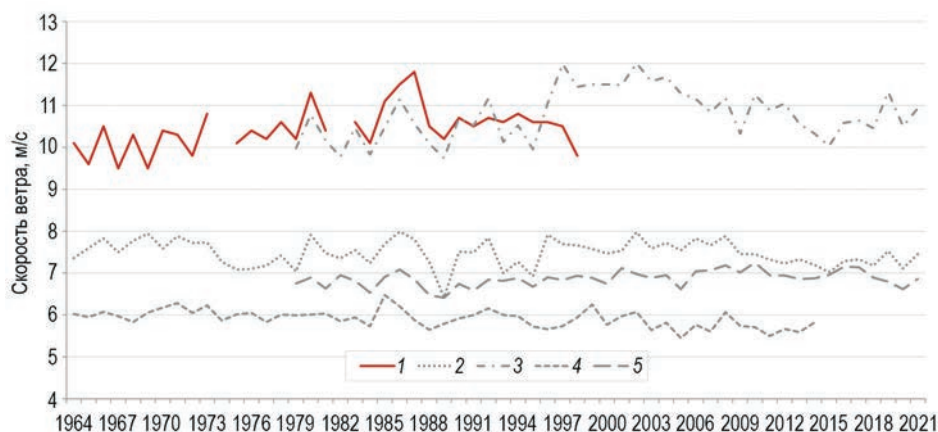


Рис. 2. Изменение среднегодовой скорости ветра на высоте 10 м по данным инструментальных наблюдений на станции Молодежная и рядам реанализа для ближайших к станции узлов сетки: 1 — ст. Молодежная; 2 — NCEP/NCAR 1; 3 — NCEP-DOE 2; 4 — 20CRv2; 5 — ERA5

Fig. 2. Change in mean annual wind speed at a height of 10 m according to instrumental observations at the Molodezhnaya station and reanalysis series for grid nodes closest to the station: 1 — Molodezhnaya station; 2 — NCEP/NCAR 1; 3 — NCEP-DOE 2; 4 — 20CRv2; 5 — ERA5

Температура приземного воздуха

Данные наземных наблюдений на метеорологической станции Молодежная показывают, что в среднем за 35-летний период полных лет наблюдений с 1964 по 1998 г. среднегодовая температура на станции составляла $-10,98 \pm 0,13$ °C, варьируя от $-9,9$ до $-12,2$ °C (см. рис. 2). Отмечалась большая вариабельность среднемесячных минимумов по сравнению с максимумами (табл. 3). Разброс зимних температур (июнь–август) был в 8 раз больше, чем летних (декабрь–февраль) и в 2,3–2,4 раза больше, чем весенних и осенних.

Для всего периода инструментальных наблюдений в динамике среднегодовой температуры на ст. Молодежная наблюдалась статистически незначимая тенденция к потеплению (скорость изменений или линейный коэффициент b составил $0,017 \pm 0,055$ °C/10 лет), по среднемесячным максимумам выявлялся отрицательный тренд ($b = -0,19 \pm 0,07$ °C/10 лет). Среднемесячные минимумы характеризовались положительным, статистически незначимым трендом ($b = 0,10 \pm 0,15$ °C/10 лет).

В динамике среднемесячной температуры наибольший и статистически значимый рост отмечался для июля и июня ($b = 0,99$ и $0,39$ °C/10 лет), наибольшее понижение — для мая и декабря ($b = -0,53$ и $-0,29$ °C/10 лет).

Таблица 3

Результаты сравнительного анализа инструментальных наблюдений на ст. Молодежная за температурой и скоростью ветра в приемном слое атмосферы с рядами реанализа для ближайших к станции узлов сетки по периодам

Table 3

Results of the comparative analysis of the temperature and wind speed series of instrumental observations at the Molodezhnaya station and the reanalysis series for grid nodes closest to the station by periods

Ряд данных	Период, годы	Среднегодовое значение ± ст. ошибка	Коефф. линейного тренда, °С или м/с за 10 лет		Количество отклонений от ср. годовой нормы		Среднемесячные экстремумы	
			без сглаживания	с использованием метода многократного скользящего выравнивания, длина базы 15 лет	положительные	отрицательные	мин. знач. ± ст. ошибка	макс. знач. ± ст. ошибка
Приземная температура воздуха, °С								
Ст. Молодежная	1964–1983	-11,0 ± 0,11	-0,10	0,017 ± 0,055 (t = 0,31, df = 34)	11	9	-19,9 ± 0,36	-0,3 ± 0,17
	1979–1998	-11,0 ± 0,14	0,10		10	10	-20,0 ± 0,44	-0,6 ± 0,17
	1964–1983	-11,0 ± 0,14	0,02		11	9	-19,9 ± 0,37	-0,6 ± 0,17
	1979–1998	-10,9 ± 0,16	0,04	0,030 ± 0,046 (t = 0,67, df = 53)	11	9	-19,9 ± 0,44	-0,7 ± 0,17
	1998–2017	-10,8 ± 0,13	0,01		11	9	-19,9±0,44	-2,1±0,28
UDEL_AirT V5.01	1964–1983	-11,4 ± 0,10	-0,04		11	9	-20,2 ± 0,38	-0,8 ± 0,17
	1979–1998	-11,4 ± 0,15	0,03	0,049 ± 0,044 (t = 1,11, df = 53)	8	12	-20,3 ± 0,48	-0,9 ± 0,17
	1998–2017	-11,3 ± 0,13	0,43		8	12	-20,3 ± 0,37	-1,0 ± 0,18
	1979–1998	-13,6 ± 0,11	-0,12		11	9	-22,3 ± 0,41	-3,8 ± 0,16
	1998–2017	-13,9 ± 0,14	0,14	-0,151 ± 0,045 (t = 3,36, df = 38)	8	12	-22,4 ± 0,34	-4,5 ± 0,18
Скорость ветра в приемном слое атмосферы, м/с								
Ст. Молодежная	1964–1983*	10,4 ± 0,11	0,41		5	13	4,9 ± 0,13	15,4 ± 0,26
	1979–1998	10,7 ± 0,12	-0,16	0,287 ± 0,073 (t = 3,95, df = 34)	14	5	5,6 ± 0,17	15,9 ± 0,22
	1979–1998	6,8 ± 0,04	0,02		12	8	4,8 ± 0,10	8,6 ± 0,10
ERA5	1998–2017	7,0 ± 0,03	0,08	0,105 ± 0,022 (t = 4,01, df = 38)	18	2	5,1 ± 0,10	8,6 ± 0,11

* — на ст. Молодежная для нескольких месяцев 1974 и 1982 гг. данные по скоростям ветра не представлены, поэтому среднегодовая для них не рассчитывалась, а линейные тренды получены с использованием средней арифметической соседних лет; t — расчетное значение t -критерия Стьюдента; df — число степеней свободы; жирным шрифтом выделены статистически значимые оценки трендов при уровне значимости $\alpha = 0,01$

Таким образом, температурные характеристики приземного слоя воздуха в районе станции Молодежная за период метеонаблюдений (1964–1998) описывались слабо выраженной положительной динамикой среднегодовых значений, температурный тренд статистически не подтвержден, изменения в основном касались отдельных месяцев года, были разнонаправленными и тем самым компенсировали друг друга.

Для анализа периода большего временного охвата, в том числе последних десятилетий, были использованы данные реанализа: ряды UDEL_AirT, ERA5 и GISS, которые показали наилучшую согласованность с температурными рядами ст. Молодежная (см. рис. 1). При их совокупном рассмотрении отмечены сходные тенденции, которые прослеживались в одни и те же отрезки времени.

На протяжении двух первых десятилетий с начала работы научной станции (1964–1983) по всем массивам данных отмечалось незначительное понижение или рост среднегодовой температуры, скорость изменений варьировала от $-0,10$ до $0,02$ °C/10 лет, что свидетельствует о достаточной стабильности температурных условий рассматриваемого периода (см. табл. 3). В многолетней динамике температур большинства месяцев года отмечался небольшой отрицательный тренд, за исключением периода с июля по сентябрь. Примечательно, что характер этих изменений, оцененный по разным исходным данным, хорошо согласуется (рис. 3).

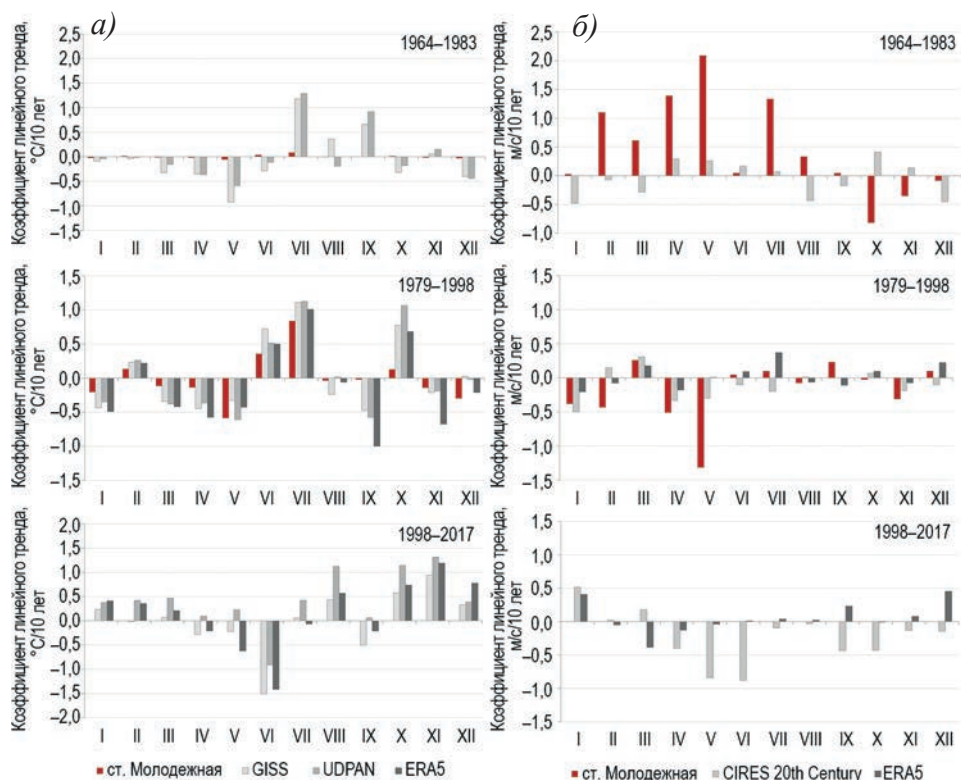


Рис. 3. Линейные коэффициенты трендов приземной температуры воздуха (а) и скорости ветра (б) по месяцам в соответствии с данными различных рядов для многолетних периодов
Fig. 3. Linear coefficients of trends in surface air temperatures (a) and wind speeds (b) by months in accordance with the data of various series for long-term periods

Для следующего отрезка времени (1979–1998 гг.) были отмечены в целом близкие по направленности тенденции в изменении средней температуры различных месяцев года: положительные преобладали в теплый период, отрицательные — в холодный. Наиболее значительное повышение температуры наблюдалось в июле, при этом характерный для предыдущего периода сентябрьский рост сдвинулся на октябрь, к нему добавилась положительная динамика в июле и феврале (см. рис. 3). Соответственно, для среднегодовой температуры этого периода с большей вероятностью выявлялись положительные тенденции (кроме рядов ERA5), оцененные по разным данным скоростью изменений от $-0,12$ до $0,1$ °C/10 лет. Вместе с тем среднегодовые нормы температур первых двух из выделенных периодов практически идентичны, различия в одну десятую градуса обнаруживаются только по ряду GISS. Также по всем массивам данных зафиксирован рост разброса среднегодовых значений (выросла ошибка среднего), который, вероятно, и обусловил появление малозначительных трендов.

Таким образом, выводы, сделанные по данным ст. Молодежная за весь период непрерывных измерений (1964–1998), в основном подтверждаются данными реанализа и свидетельствуют о незначительности изменений среднегодовых температурных характеристик, более существенные сдвиги были отмечены во внутригодовом распределении среднемесячных температур.

Период 1998–2017 гг. характеризуется положительными трендами среднегодовой температуры по разным рядам данных со скоростями прироста температур от $0,01$ до $0,43$ °C/10 лет. При этом изменения в средних значениях согласно рядам данных GISS и UDEL_AirT составляют $+0,1$ °C, а по рядам ERA5 — $-0,3$ °C (см. табл. 3). С учетом значений стандартной ошибки среднего, статистически значимые различия между среднегодовыми температурами второго и третьего выделенных периодов имеются только по ряду ERA5.

В многолетней динамике температур отдельных месяцев отмечены более выраженные изменения: в относительно теплую часть года тенденция к понижению температуры сменилась тенденцией к росту, а в холодную начало наблюдаться замедление скорости потепления или даже наметилась тенденция к похолоданию (согласно рядам GISS и ERA5). Наибольший рост температуры отмечен для ноября, октября и августа, а понижение — для июня. В целом тенденция к потеплению начала преобладать на протяжении большей части года: для 7 месяцев она выявлялась по всем анализируемым рядам, еще для 4 месяцев в зависимости от типа данных она была оценена как разнонаправленная. Понижение температуры, которое подтверждается всеми рядами данных, выявлено только для 1 месяца (см. рис. 3).

Оценки трендов, полученные по всей длине временного ряда методом многократного скользящего выравнивания, также показали преимущественно положительный, но статистически не значимый рост среднегодовой температуры, за исключением данных ERA5 (см. табл. 3).

Таким образом, интенсивность и направленность многолетних изменений среднемесячных температур в районе оазисов Молодежный и Вечерний в разные периоды менялась. За счет разнонаправленной динамики происходила взаимная компенсация, в результате чего среднегодовая температура оставалась близка к норме, различия между разными периодами времени были статистически не значимы. В то же время анализ динамики среднемесячных температур показывает, что происходит поступательное увеличение количества периодов в году, имеющих тенденцию к потеплению. В связи с этим о незначительном росте температуры в последние два десятилетия можно говорить с большей вероятностью, чем для периода первых десятилетий от начала инструментальных наблюдений на станции Молодежная.

Оценить масштаб и распространность выявленных тенденций можно на основе пространственно-распределенного анализа трендов температуры в районе исследования, который позволяют выполнить данные реанализа, распределенные по сетке. Для решения этой задачи были использованы температурные ряды ERA5 и UDEL_AirT. При сравнении с инструментальным рядом наблюдений первые давали заниженную оценку скоростей изменения, а вторые — завышенную. Анализ выполнялся для территории охватом 44–50° з. д. и 65,5–70° ю. ш., расположенной в западной части Земли Эндерби (рис. 4).

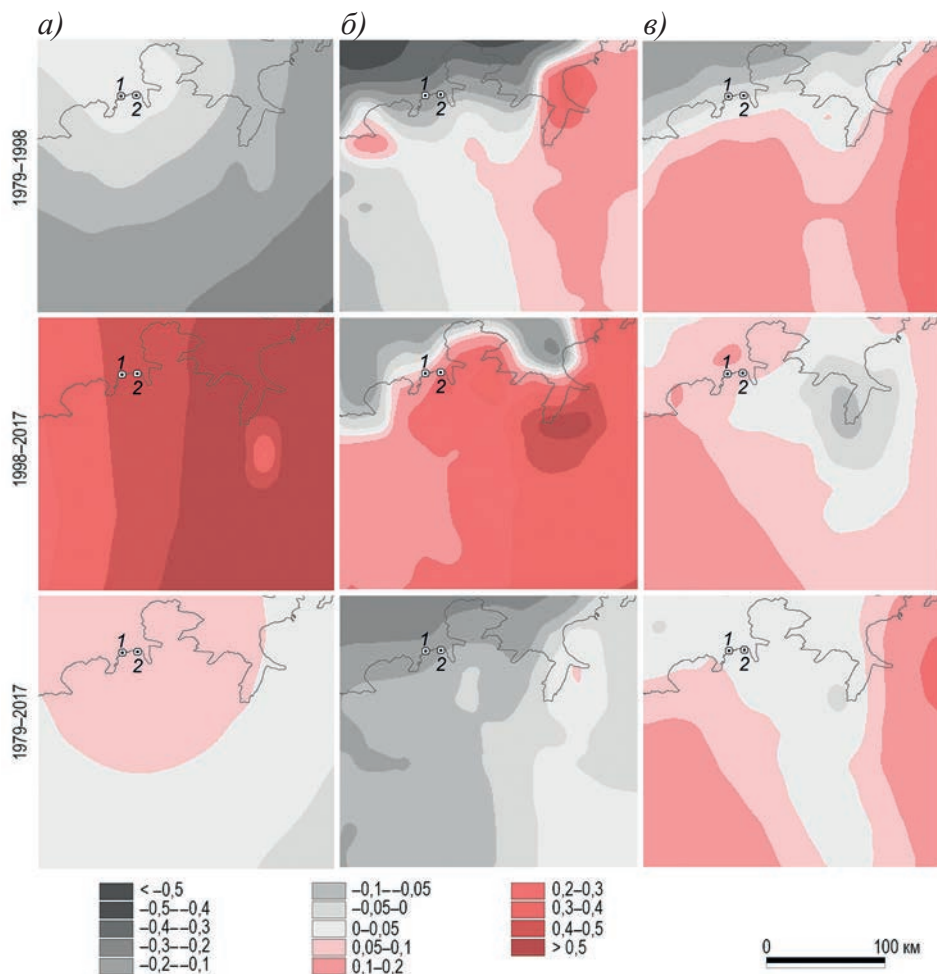


Рис. 4. Интенсивность изменения среднегодовой температуры воздуха (°C/10 лет) и скорости ветра (м/с/10 лет) по данным реанализа для многолетних периодов: а) тренды температуры по данным UDEL_AirT, б) тренды температуры по данным ERA5, в) тренды скорости ветра по данным ERA5. Цифрами на карте обозначено: 1 — станция Молодежная, 2 — район базирования Белорусской антарктической экспедиции

Fig. 4. Intensity of change in average annual air temperatures (°C/10 yr) and wind speeds (m/s/10 yr) according to reanalysis data for long-term periods: а) temperature trends according to UDEL_AirT data, б) temperature trends according to ERA5 data, в) wind speed trends according to ERA5 data

Поля, полученные по разным данным, отличаются характером расположения изолиний, тем не менее выявляется общая направленность изменений, отличающая различные временные отрезки. В период до 1998 г. на значительной части исследуемой территории скорости изменения температуры были незначительными. По данным UDEL_AirT над сушей преобладала тенденция к похолоданию, а по данным ERA5 — к незначительному потеплению. Значения линейных коэффициентов трендов на большей части исследуемой территории варьировали от $-0,3$ до $+0,15$ °C/10 лет. Более интенсивное потепление отмечено только для небольшого участка вблизи впадения в океан ледника Райнера (Rayner Glacier) — по данным ERA5.

Оценки для последующих двух десятилетий показывают более интенсивный рост среднегодовой температуры, до $+0,55$ °C за 10 лет, а по данным UDEL_AirT еще выше. Рост температуры наблюдался повсеместно на исследуемой территории, только ряды ERA5 на небольшом участке в прибрежной части показывают противоположную тенденцию.

Однако в целом для более продолжительного промежутка времени, с 1979 по 2017 г., среднегодовая температура значительных изменений не претерпела: незначительное похолодание 80–90-х компенсировалось потеплением последних двух десятилетий. Скорость изменения среднегодовой температуры в разных точках над сушей составляла от $-0,1$ до $0,2$ °C/10 лет. Потепление 1998–2017 гг. в наибольшей степени коснулось юго-восточной части исследуемой территории.

Скорости и направления ветра

По данным стационарных наблюдений на станции Молодежная (<http://www.aari.aq/>), а также на АМС, установленных в недавнее время, выявлено, что скорость ветра на Земле Эндерби и прилегающей территории варьирует в широких пределах: от штилевых условий до штормовых и ураганных ветров. В районе г. Вечерняя максимальный зарегистрированный порыв ветра достиг 56 м/с (февраль 2018 г.), на станции Молодежная — до 70 м/с и более. Среднегодовая норма скорости ветра составила $10,4 \pm 0,09$ м/с.

Анализ среднегодовых значений скорости ветра, наблюдавшихся на станции Молодежная в период 1963–1999 гг., выявил положительную и статистически значимую динамику, которая сильнее всего наблюдалась до 1984 г. (см. табл. 3).

Самым маловетренным месяцем на станции Молодежная был январь 1974 г. со средней скоростью ветра 3,2 м/с, а наиболее ветреным — апрель 1986 г. со средней скоростью 17,6 м/с. Наибольшие скорости ветра чаще наблюдались в осенний (март–май) и зимний (июнь–июль) периоды.

В динамике розы ветров выявлено возрастание повторяемости ЮВ ветров, обычно доминирующих с марта по июнь, и уменьшение южных (рис. 5). Если до 1987 г. доля ЮВ ветров составляла преимущественно менее 30 % (в такие годы возрастала частота южных ветров), то с конца 1980-х она возросла до 40 % и более (исключение 1997 г.).

Анализ данных ERA5 для ближайшего к ст. Молодежной узла сетки показал, что имеется статистически подтвержденный положительный тренд среднегодовых скоростей ветра, который наиболее выражен в последние десятилетия. В период 1979–1998 гг. прирост происходил существенно более низкими темпами. О возрастании среднегодовых скоростей ветра говорит также и увеличение со временем числа положительных отклонений от нормы (см. табл. 3).

Пространственный анализ трендов по данным ERA5 показал, что рост скоростей ветра наблюдается над большей частью Земли Эндерби (см. рис. 4). Значения линейного коэффициента тренда на рассматриваемой территории варьируют

от $-0,050$ до $0,3$ м/с/10 лет. Ближе к центральной меридиональной полосе (вдоль долготы $46-48^\circ$) они близки к нулю и возрастают к краевым частям, по направлению к Земле Королевы Мод на западе и к Земле Кемпа на востоке.

Различия в динамике скоростей по месяцам года сложно оценить из-за неудовлетворительного согласования разных рядов данных (см. рис. 3). Более чем для половины месяцев в году обнаруживается разнонаправленная динамика по рядам реанализа и рядам инструментальных наблюдений. Это обстоятельство не позволяет сделать однозначный вывод о преобладании определенной тенденции в тот или иной период года.

В динамике розы ветров по данным ERA5 не было выявлено значимых изменений за весь исследуемый период (рис. 5). Отмечается, что распределения полей ветра исходя из рядов реанализа, оцененные по 24-кратным суточным данным,

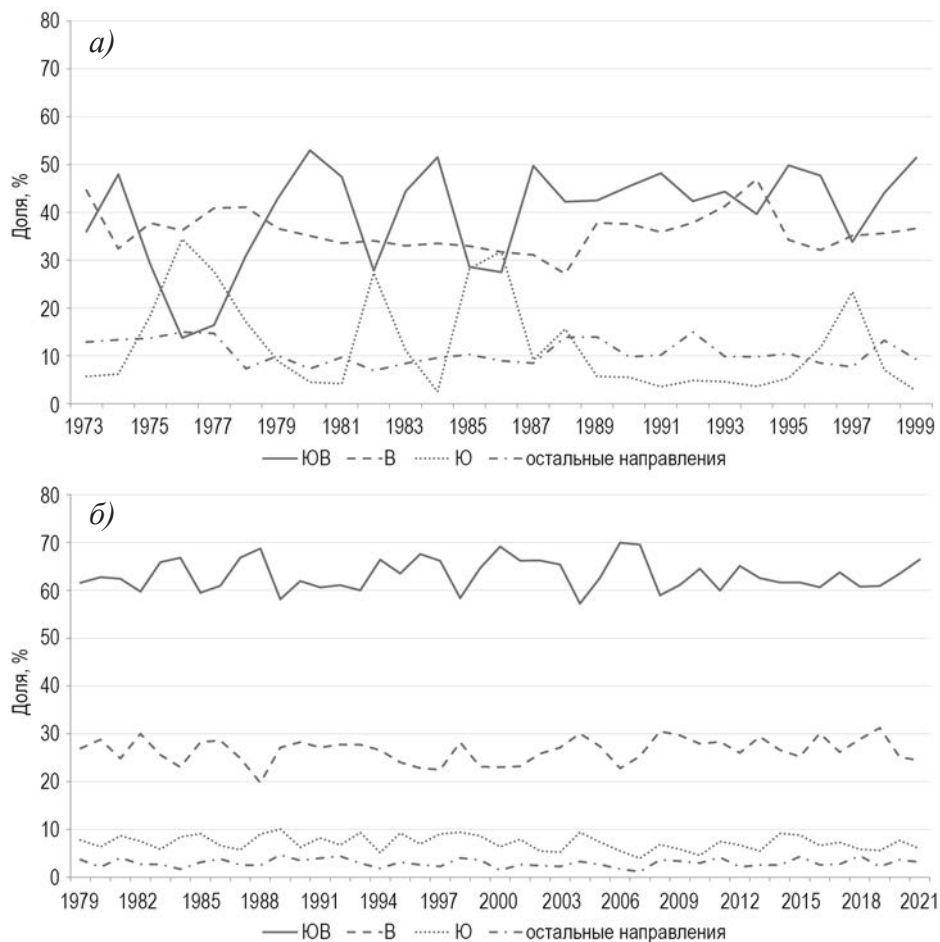


Рис. 5. Изменения в распределении полей ветра по направлениям: а) по данным наблюдений на станции Молодежная за период 1973–1998 гг., % (<ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/noaa>); б) по данным рядов реанализа ERA5 (<https://cds.climate.copernicus.eu/>)

Fig. 5. Changes in the distribution of wind fields by directions: а) according to observations at the Molodezhnaya station for the period 1973–1998, % (<ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/noaa>), б) according to ERA5 reanalysis data (<https://cds.climate.copernicus.eu/>)

являются значительно менее вариабельными по сравнению с данными наземных наблюдений. Также по данным ERA5 выявляется более высокая доля ветров ЮВ и Ю направлений и меньшая — восточных.

В целом по результатам анализа различных данных по характеристикам ветра на Земле Эндерби с достаточно высокой вероятностью можно говорить только о росте среднегодовых скоростей ветра, которая в среднем оценивается в 0,1–0,3 м/с/10 лет.

Сравнение с литературными данными

Наиболее детальные данные по динамике климатических показателей в районе Земли Эндерби содержатся в работе [1], которая выполнена на основе анализа многолетних данных наземных наблюдений до 2000 г. Для среднегодовой температуры на станции Молодежная описан незначительный отрицательный тренд, который убывает с течением времени: $-0,11 \pm 0,43$ в 1961–1990 и $-0,04 \pm 0,45$ в 1971–2000 гг. Оценки получены для периодов, отличающихся от принятых в настоящей работе. Тем не менее хорошо совпадают значения трендов, полученных для первых десятилетий, а также общая тенденция к замедлению темпов похолодания (см. табл. 3).

В исследовании [18] тренд-анализ температуры приземного воздуха выполнен для 20- (1979–1998) и 45-летних (1954–1998) периодов, показаны изменения среднегодовой температуры приземного воздуха для соседних со станцией Молодежная станций Сёва и Моусон, которые для периода 1979–1998 гг. оцениваются соответственно в $-0,46$ и $+0,15$ °C/10 лет. Анализ динамики температуры по спутниковым данным за этот же период для разных районов Антарктики показал тренды от $-0,42 \pm 0,67$ °C/10 лет. Для района Земли Эндерби, согласно приложенной карте, эти значения варьируют преимущественно от $-0,5$ до $+0,5$ °C/10 лет. В таких же пределах находятся полученные нами оценки для этого района по данным реанализа UDEL AirT и ERA5 (см. рис. 4).

По скоростям ветра в исследовании [1] для станции Молодежная данные не представлены, а для соседних станций Сёва и Моусон тренды среднегодовых скоростей оценены соответственно в $+0,085 \pm 0,231$ узлов/10 лет ($0,044 \pm 0,119$ м/с/10 лет) и $+0,046 \pm 0,519$ узлов/10 лет ($0,024 \pm 0,267$ м/с/10 лет), что близко к значениям, полученным нами для соответствующих районов по данным ERA5 (см. рис. 4). Согласно оценкам [16] на станции Молодежная выявляется рост средних скоростей ветра зимнего периода ($+0,23$ м/с/10 лет для 1963–1998 и $0,02$ м/с/10 лет для периода 1979–2006 гг.), а также увеличение повторяемости сильных ветров, $>17,2$ м/с ($+4,2$ случая/10 лет для 1963–1998 и $+0,8$ случаев/10 лет для периода 1979–2006 гг.). В исследовании [19], по данным реанализа ERA-Interim, динамика скоростей ветра в целом для Восточной Антарктики оценивается как положительная, особенно для летнего и весеннего периодов. Эти данные хорошо соотносятся с результатами, полученными в настоящем исследовании.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании выполненного анализа выявлено, что наилучшие результаты при сопоставлении с данными инструментальных наблюдений дают температурные ряды реанализа. Из них хорошую сходимоть, как по средним значениям, так и по динамике, имеют ряды UDEL AirT, ERA5 и GISS. Характеристики ветра надежнее описываются рядами ERA-Interim и NCEP-DOE Reanalysis 2. При этом с первыми обнаруживается более высокая теснота связи (корреляция) при существенно заниженных средних значениях, а со вторыми — большая сходимость средних значений при плохой согласованности динамики.

Тренд-анализ среднемесячных и среднегодовых значений большинства температурных рядов для района Земли Эндерби показал наличие статистически не

значимой тенденцию к потеплению. Интенсивность и направленность изменений в разные отрезки времени для разных периодов года менялась, из-за этого общий тренд изменений был незначительным. В то же время анализ среднемесячных температур показывает, что происходит поступательное увеличение количества периодов в году, имеющих тенденцию к потеплению. Если в 1964–1983 гг. рост температуры был выявлен только для июля и сентября, в последующие годы оно отмечалось в феврале, июне, июле и октябре, а для 1998–2017 гг. — для большей части месяцев года (7). Это позволяет сделать вывод об ускорении положительной динамики в росте температуры в последние два десятилетия, хотя она не достигла значимых величин.

По анализу характеристик ветра для района Земли Эндерби, в связи с несогласованностью разных рядов данных, достаточно уверенно можно говорить только о статистически значимом росте среднегодовых скоростей ветра примерно на 0,1–0,3 м/с/10 лет.

Конфликт интересов. Конфликт интересов отсутствует.

Финансирование. Работа выполнена в рамках Государственных программ «Мониторинг полярных районов Земли, создание Белорусской антарктической станции и обеспечение деятельности полярных экспедиций на 2016–2020 годы» и «Развитие деятельности белорусской антарктической станции» на 2021–2025 гг.

Competing interests. There is no conflict of interest.

Funding. The work was carried out within the framework of the State programs “Monitoring of the polar regions of the Earth, development of the Belarusian Antarctic station and supporting the activities of polar expeditions for 2016–2020” and “Development of the activities of the Belarusian Antarctic station” for 2021–2025.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Turner J., Colwell S. R., Marshall G. J., Lachlan-Cope T. A., Carleton A. M., Jones P. D., Lagun V., Reid P. A., Iagovkina S. Antarctic climate change during the last 50 years // *International journal of Climatology*. 2005. V. 25. № 3. P. 279–294.
2. Turner J., Bindshadler R. A., Convey P., Di Prisco G., Fahrbach E., Gutt J., Hodgson D. A., Mayewski P. A., Summerhayes C. P. Antarctic Climate Change and the Environment. Cambridge: SCAR, 2009. 526 p.
3. Turner J., Barrand N. E., Bracegirdle T. J., Convey P., Hodgson D. A., Jarvis M., ... & Klepikov A. Antarctic climate change and the environment: an update // *Polar Record*. 2014. V. 50. № 3. P. 237–259. doi: 10.1017/S0032247413000296.
4. Gillett N. P., Stone D. A., Stott P. A., Nozawa T., Karpechko A. Y., Hegerl G. C., Wehner M. F., Jones P. D. Attribution of polar warming to human influence // *Nature Geoscience*. 2008. V. 1. № 11. P. 750–754.
5. Convey P. Antarctic climate change and its influences on terrestrial ecosystems // Bergstrom D., Convey P., Huiskes A. H. L. (eds.). *Trends in Antarctic terrestrial and limnetic ecosystems: Antarctica as a global indicator*. Dordrecht: Springer, 2006. P. 253–272.
6. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate / H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N. M. Weyer (Eds.). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2019. <https://www.ipcc.ch/srocc/home/>.
7. Convey P., Bindshadler R., Di Prisco G., Fahrbach E., Gutt J., Hodgson D. A., Mayewski P. A., Summerhayes C. P., Turner J. Antarctic climate change and the environment // *Antarctic Science*. 2009. V. 21. № 6. P. 541–563.

8. Marshall G.J., Orr A., Turner J. A predominant reversal in the relationship between the SAM and East Antarctic temperatures during the twenty-first century // *Journal of Climate*. 2013. V. 26. № 14. P. 5196–5204.
9. Bromwich D.H., Nicolas J.P., Monaghan A.J., Lazzara M.A., Keller L.M., Weidner G.A., Wilson A.B. Central West Antarctica among the most rapidly warming regions on Earth // *Nature Geoscience*. 2013. V. 6. P. 139–145. doi: 10.1038/ngeo1671.
10. Steig E.J., Schneider D.P., Rutherford S.D., Mann M.E., Comiso J.C., Shindell D.T. Warming of the Antarctic ice-sheet surface since the 1957 International Geophysical Year // *Nature*. 2009. V. 457. № 7228. P. 459–462.
11. Bracegirdle T.J., Connolley W.M., Turner J. Antarctic climate change over the twenty first century // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2008. V. 113. D03103. doi: 10.1029/2007JD008933.
12. Robinson S.A., King D.H., Bramley-Alves J., Waterman M.J., Ashcroft M.B., Wasley J., Turnbull J.D., Miller R.E., Ryan-Colton E., Benny T., Mullany K., Clarke L. J., Barry L., Hua Q. Rapid change in East Antarctic terrestrial vegetation in response to regional drying // *Nature Climate Change*. 2018. V. 8. № 10. P. 879–884.
13. Harig C., Simons F.J. Accelerated West Antarctic ice mass loss continues to outpace East Antarctic gains // *Earth and Planetary Science Letters*. 2015. V. 415. P. 134–141.
14. Zwally H.J., Giovinetto M.B. Overview and assessment of Antarctic ice-sheet mass balance estimates: 1992–2009 // *Surveys in Geophysics*. 2011. V. 32. № 4. P. 351–376.
15. Эндерби Земля // *Словарь современных географических названий* / Под общ. ред. акад. В. М. Котлякова. Институт географии РАН. Екатеринбург: У-Фактория, 2006.
16. Turner J., Chenoli S.N., Abu Samah A., Marshall G., Phillips T., Orr A. Strong wind events in the Antarctic // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2009. V. 114. D18103. doi: 10.1029/2008JD011642.
17. Merzlyakov E.G., Murphy D.J., Vincent R.A., Portnyagin Y.I. Long-term tendencies in the MLT prevailing winds and tides over Antarctica as observed by radars at Molodezhnaya, Mawson and Davis // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2009. V. 71. № 1. P. 21–32.
18. Comiso J.C. Variability and trends in Antarctic surface temperatures from in situ and satellite infrared measurements // *Journal of Climate*. 2000. V. 13. № 10. P. 1674–1696.
19. Yu L., Zhong S., Sun B. The climatology and trend of surface wind speed over Antarctica and the Southern Ocean and the implication to wind energy application // *Atmosphere*. 2020. V. 11. № 1. P. 108. doi: 10.3390/atmos11010108.
20. Афанасьев В.Н., Юзбашев М.М. Анализ временных рядов и прогнозирование. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Финансы и статистика, 2012. 320 с.

REFERENCES

1. Turner J., Colwell S. R., Marshall G. J., Lachlan-Cope T. A., Carleton A. M., Jones P. D., Lagun V., Reid P.A., Iagovkina S. Antarctic climate change during the last 50 year. *International journal of Climatology*. 2005, 25 (3): 279–294.
2. Turner J., Bindshadler R.A., Convey P., Di Prisco G., Fahrbach E., Gutt J., Hodgson D.A., Mayewski P.A., Summerhayes. C.P. *Antarctic Climate Change and the Environment*. Cambridge: SCAR, 2009: 526 p.
3. Turner J., Barrand N. E., Bracegirdle T. J., Convey P., Hodgson D. A., Jarvis M., ... & Klepikov A. Antarctic climate change and the environment: an update. *Polar Record*. 2014, 50 (3): 237–259. doi: 10.1017/S0032247413000296.
4. Gillett N.P., Stone D.A., Stott P.A., Nozawa T., Karpechko A.Y., Hegerl G.C., Wehner M.F., Jones P.D. Attribution of polar warming to human influence. *Nature Geoscience*. 2008, 1 (11): 750–754.

5. Convey P. Antarctic climate change and its influences on terrestrial ecosystems. Bergstrom D., Convey P., Huiskes A.H.L. (eds.). Trends in Antarctic terrestrial and limnetic ecosystems: Antarctica as a global indicator. Dordrecht: Springer, 2006: 253–272.
6. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (Eds.). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2019. <https://www.ipcc.ch/srocc/home/>
7. Convey P., Bindshadler R., Di Prisco G., Fahrbach E., Gutt J., Hodgson D.A., Mayewski P.A., Summerhayes C.P., Turner J. Antarctic climate change and the environment. Antarctic Science. 2009, 21 (6): 541–563.
8. Marshall G.J., Orr A., Turner J. A predominant reversal in the relationship between the SAM and East Antarctic temperatures during the twenty-first century. Journal of Climate. 2013, 26 (14): 5196–5204.
9. Bromwich D.H., Nicolas J.P., Monaghan A.J., Lazzara M.A., Keller L.M., Weidner G.A., Wilson A.B. Central West Antarctica among the most rapidly warming regions on Earth. Nature Geoscience. 2013, 6: 139–145. doi: 10.1038/ngeo1671.
10. Steig E.J., Schneider D.P., Rutherford S.D., Mann M.E., Comiso J.C., Shindell D.T. Warming of the Antarctic ice-sheet surface since the 1957 International Geophysical Year. Nature. 2009, 457 (7228): 459–462.
11. Bracegirdle T.J., Connolley W.M., Turner J. Antarctic climate change over the twenty first century. Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2008, 113: D03103. doi: 10.1029/2007JD008933.
12. Robinson S.A., King D.H., Bramley-Alves J., Waterman M.J., Ashcroft M.B., Wasley J., Turnbull J.D., Miller R.E., Ryan-Colton E., Benny T., Mullany K., Clarke L. J., Barry L., Hua Q. Rapid change in East Antarctic terrestrial vegetation in response to regional drying. Nature Climate Change. 2018, 8 (10): 879–884.
13. Harig C., Simons F.J. Accelerated West Antarctic ice mass loss continues to outpace East Antarctic gains. Earth and Planetary Science Letters. 2015, 415: 134–141.
14. Zwally H.J., Giovinetto M.B. Overview and assessment of Antarctic ice-sheet mass balance estimates: 1992–2009. Surveys in Geophysics. 2011, 32 (4): 351–376.
15. Enderby Land. Dictionary of modern geographical names. Ed. V. M. Kotlyakov. Institute of Geography RAS. Yekaterinburg: U-Factoria, 2006. [In Russian].
16. Turner J., Chenoli S.N., Abu Samah A., Marshall G., Phillips T., Orr A. Strong wind events in the Antarctic. Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2009, 114: D18103. doi: 10.1029/2008JD011642.
17. Merzlyakov E.G., Murphy D.J., Vincent R.A., Portnyagin Y.I. Long-term tendencies in the MLT prevailing winds and tides over Antarctica as observed by radars at Molodezhnaya, Mawson and Davis. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2009, 71 (1): 21–32.
18. Comiso J.C. Variability and trends in Antarctic surface temperatures from in situ and satellite infrared measurements. Journal of Climate. 2000, 13 (10): 1674–1696.
19. Yu L., Zhong S., Sun B. The climatology and trend of surface wind speed over Antarctica and the Southern Ocean and the implication to wind energy application. Atmosphere. 2020, 11 (1): 108. <https://doi.org/10.3390/atmos11010108>.
20. Afanas'ev V.N. Yuzbashev M.M. Analiz vremennykh ryadov i prognozirovaniye. 2-e izd., pererab. i dop. Time series analysis and forecasting. Moscow: Finansy i statistika, 2012: 320 p. [In Russian].

ГИДРОЛОГИЯ СУШИ И ГИДРОХИМИЯ
HYDROLOGY OF LAND AND HYDROCHEMISTRY

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-2-160-172>

УДК 505.5



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

Fractions of trace metals in the sediments of permafrost-affected lakes in Northern Siberia, Lena delta

Alina V. Guzeva^{1*}, Irina R. Elizarova², Artem E. Lapenkov¹, Zakhar I. Slukovskii²

¹ — St. Petersburg Federal Research Center of RAS, Institute of Limnology RAS,
St. Petersburg, Russia

² — Institute of the North Industrial Ecology Problems of Kola Science Center of RAS,
Apatity, Russia

*olina2108@mail.ru

Summary

The aim of the study is to estimate the role of sediment components in the accumulation of microelements in lakes of the permafrost-affected area (the Lena Delta, northern Siberia). A fractional analysis of several trace elements (V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Sn, and Pb) was conducted. Samples were collected from 10 lakes during the summer period of the “LENA 2019” expedition. The content of the chemical elements in the sediments was measured with the ICP-MS instrument. The results of the work show a relatively homogeneous distribution of the acid-soluble forms of the metals in sediments from different lakes. The content of trace elements in all the lakes studied is determined by natural (lithogenic) sources. Stable minerals inherited from the rocks play a crucial role in the sediment formation. Most of the elements are predominantly fixed in stable mineral and organometallic fractions. However, for V, Co, and Cr a high level of geochemical mobility was identified in some of the lakes. The metals of soluble complexes are capable of migrating from the sediments to the water due to physical and chemical changes in the aquatic environment. Furthermore, the organic substances and the Fe/Mn hydroxides of the sediments have a low potential ability to bind the metals into stable compounds.

Keywords: fractions of metals, lake sediments, Lena Delta, permafrost, Siberia.

For Citation: Guzeva A.V., Elizarova I.R., Lapenkov A.E., Slukovskii Z.I. Fractions of trace metals in the sediments of permafrost-affected lakes in Northern Siberia, Lena delta. *Problemy Arktiki i Antarkтики*. Arctic and Antarctic Research. 2022, 68 (2): 160–172. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-2-160-172>.

Received 30.05.2022

Revised 15.06.2022

Accepted 16.06.2022

INTRODUCTION

The Lena Delta is located in a permafrost-affected area of the Russian Arctic (Fig. 1). There are numerous lakes within the territory. Their hydrological and hydrochemical features are predominantly affected by surface fluxes from the catchment areas, the groundwater of the active layer, and the flooding regime of the river Lena [1–3].

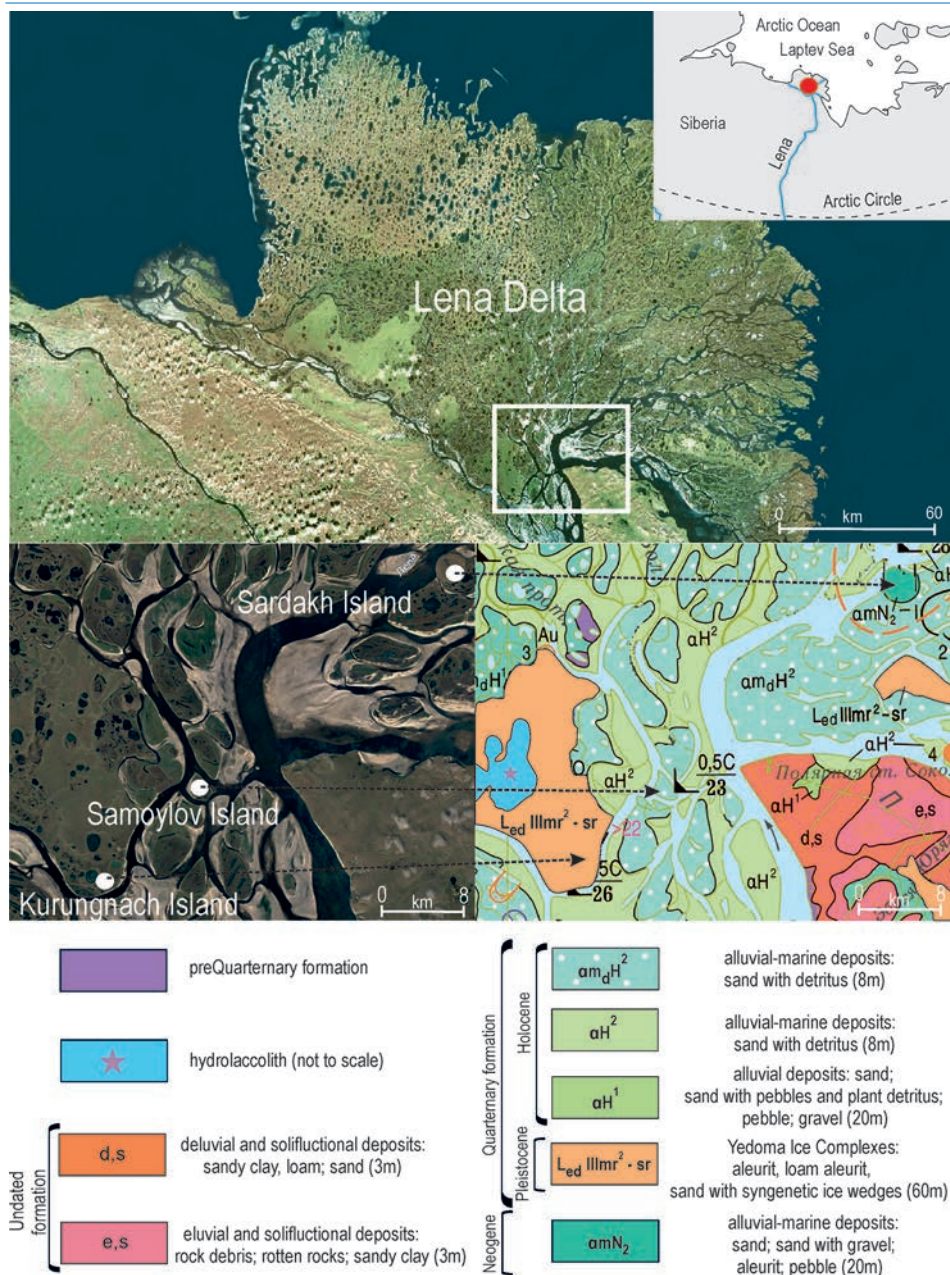


Fig. 1. The area studied [16]

Рис. 1. Территория исследования [16]

Furthermore, the ongoing thermokarst processes can also influence them by releasing chemical elements from the permafrost deposits present under the lake bottom [3, 4]. The lake sediments constitute the terminal accumulation matrix of chemical substances in the aquatic ecosystems. However, the accumulated chemical elements can be released from

the sediment to the water column if there are changes in the physicochemical parameters of the environment. In this context, two aspects of trace element content in the sediments are important to analyze: the total concentration and chemical fractions of the elements [5–7]. The assessment of the total content of the elements is necessary for understanding their regional background concentrations in the sediments [8]. However, the migration mobility of metals depends on the type of chemical bonding of the elements with the mineral and organic components of the sediments [9, 10]. Humic substances, clay minerals, and Fe/Mn hydroxides are the main accumulation matrices of elements in lake sediments. They form the most stable compounds with metals. However, metal ions can be associated with sediments by weak chemical bonds. The most mobile fractions are predominantly involved in the biogeochemical cycles. Therefore, comprehensive geochemical surveys are necessary to understand the specific features of the processes of microelement migration in the permafrost-affected limnic systems.

This research is a continuation of the previous geochemical investigation of the permafrost-affected lakes of the Lena Delta in the vicinity of the Samoylov station [11]. The aim of this paper is to estimate the role of organic and mineral components of sediments in the accumulation of the trace elements (V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Sn, and Pb). Importantly, it is the first full-spectrum analysis of the chemical fractions of metals in lake sediments of the region studied that has ever been conducted.

MATERIALS AND METHODS

Study area

The delta of the Lena river is the largest in the Arctic. Its Quaternary sediments overlay the Ordovician–lower-Carboniferous terrigenous-carbonate deposits (Fig. 1). Three main geomorphological terraces have been distinguished in the Lena Delta, above the flood-plain [12, 13]. The lakes studied are located on the first terrace (Samoylov Island), the third terrace (Kurungnakh Island), and on the erosional residual outcrop (Sardakh Island). The first terrace is Holocene in age (3–4 ka BP) and is represented by sandy deposits with plant remains (moss detritus). The third terrace is composed of late Pleistocene (13–12 ka BP) ice-bearing permafrost deposits — Yedoma Ice Complexes [14]. The Sardakh Island is made up of Miocene and Pliocene deposits. Furthermore, on the island, the crystalline basement lies at a depth of about 100 m under Neogene deposits [12]. The lakes of the Lena Delta developed predominantly under thermokarst conditions [15]. The main types of water bodies are polygonal ponds, deep thermokarst lakes and ox-bow lakes [4].

Sampling procedure

Samples were taken from 10 small lakes (their areas do not exceed 0.05 km²) in August 2019 (Table 1). The hydrochemical features of the lakes of the Lena Delta can be found in a work by Chetverova et al. [3]. The surface sediment (0–10 cm) was collected using the Van Veen grab. Samples were taken at five locations within each lake, chosen in such a way as to cover the whole variety of depths of the water body. They were subsequently combined to form an integral sample for each given lake.

Chemical analysis of the sediments

For the analysis of acid-soluble forms of the trace metals, fully dried sediment subsamples were decomposed with a mixture of HNO₃ (70 %, high purity GOST 11.125–84), HCl (38 %, high purity, GOST 14.261–77) and H₂O₂ (33 %, analytical grade, GOST 10929-76). This method of acid decomposition allows extracting most of the

Table 1

Таблица 1

The characteristics of the lakes of the Lena Delta that were studied

Характеристики изученных озер дельты р. Лены

Characteristics	Lake 1	Lake 2	Molo Lake	Fish Lake	North Lake	Shallow Lake	Banya 2 Lake	Banya 3 Lake	Banya Lake	Flood Lake
Latitude (°)	72.57111	72.30856	72.37814	72.37363	72.38452	72.37506	72.37000	72.37040	72.36841	72.38704
Longitude (°)	127.23638	126.24546	126.49703	126.48692	126.48807	126.51104	126.50472	126.51721	126.48591	126.48091
Island	Sardakh	Kurungnakh	Samoylov							
Geomorphological terrace ¹	Residual outcrop	3rd	1st							
Type of lake			Thermokarst					Oxbow		Floodplain
Flooding regime ²			Isolated from river influence			Polygonal pond	Affected by high sea-sonal river floods	Regularly affected by seasonal river floods		
The depths of sampling, m	0.5–1.5	0.5–1.1	2.6–6.2	0.5–12.7	2.5–4.8	0.5–3.1	1.0–16.3	1.0–6.3	1.0–5.2	0.3–0.6
Field description of the sediments	Grey-brown aleurite	Grey sand with aleurite	Grey argillaceous silt			Grey argil-laceous silt with aleurite	Grey argillaceous aleurite	Grey argillaceous silt		
DOM (%) ³	no data	13.5	6.3	4.0	no data	4.5	6.0	15.0	7.8	no data

Note. ¹ — According to [12, 13]; ² — According to [3]; ³ — % of dispersed organic matter in the sediments according to [9]

metal ions. The exceptions are metals associated with insoluble residue (aluminosilicate compounds). However, they do not participate in biogeochemical processes, except for the mechanical movement of particles of primary minerals.

There are some fractional schemes of trace elements for soils and sediments [5, 7, 9, 17]. In this work, the following metal fractions were extracted: metal exchange forms (fraction 1), metals specifically sorbed by various components of the sediment (fraction 2), metals associated with the most stable organometallic complexes (fraction 3), metals associated with the hydrated Fe and Mn oxides (fraction 4), and the most residual (stable) phase (fraction 5), calculated by subtracting the total for the previous four fractions from the content of acid-soluble forms of the chemical element. The chemical reagents that were used for the fractional analysis are detailed in Guzeva et al. [9].

The content of trace elements in all the extractions was measured by the ICP-MS instrument (ELAN 9000, ICP-MS instrument by PerkinElmer, USA). All the analyses were performed twice. The result was accepted as correct if the difference between the values did not exceed 20 %. The parameters of the measurements are presented in Table 2. Certified reference materials (sediment sample from Lake Baikal BIL-1 — GSO 7126-94) were used for quality control.

Table 2

Parameters of ICP-MS measurement of the trace element content in the sediment samples

Таблица 2

**Параметры измерения концентраций металлов в пробах донных отложений
методом ИСП-МС**

Element	^1LOD	$^2\Delta_{\text{rel}}$	$^3\Delta_{\text{abs}}$
V	3.10	5.60	1.57
Cr	2.50	2.30	2.37
Co	0.03	1.10	0.54
Ni	6.20	5.50	1.20
Cu	0.68	1.90	0.67
Zn	0.51	12.00	3.99
Sn	0.10	19.10	0.02
Pb	0.21	4.40	0.47

Note. ^1LOD — limit of detection (mg/kg); $^2\Delta_{\text{rel}}$ (%) — the relative measurement error; $^3\Delta_{\text{abs}}$ — the absolute measurement error (mg/kg).

Data processing

The content of acid-soluble forms of the metals was statistically summarized using the maximum, minimum, and average values as well as the coefficient of variation (CV, %). It is also important to note that, even though the said content is close to the total amount, it can be lower. There was not enough data about the local geochemical background for the lake sediments of the Lena Delta, therefore clarke values for the continental crust [18] were used as the reference.

The assessment of the degree of risk to the aquatic ecosystem, in terms of the mobility (bioavailability) of metals, was carried out using the indicator of the risk of secondary water pollution (RAC index) [19]. This index takes into account the strength of the bond of metals with the sediment components (the sum of 1 and 2 fractions). According to this indicator, there are five degrees of risk: < 1 % — no risk, 1–10 % — low degree, 10–30 % — medium, 30–50 % — high, and > 50 % — very high.

RESULTS

Trace metal content in the sediments

The details of the content of acid-soluble forms of the trace metals and its comparison with the clark values are presented in Table 3. Cr, Co, Ni, Cu, Zn, and Pb are distributed quite homogeneously in sediments of different lakes from the area studied. For most of them, the value of the coefficient of variation does not exceed 33 %. The exceptions were V and Sn. Their concentrations in the sediments of polygonal Lake Shallow exceed the average values twice and thrice, respectively. Nevertheless, the concentration of all the elements is either lower or at the same level compared to the clark values.

Table 3

The content (mg/kg) of acidic-soluble forms of the trace elements in the lake sediments of the Lena Delta

Таблица 3

Содержание кислоторастворимых форм металлов (мг/кг) в пробах донных отложений озер дельты р. Лены

Lake/Element	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Sn	Pb
Lake 1	27.37	41.55	13.61	26.79	16.22	81.11	0.09	11.16
Lake 2	31.45	40.85	8.87	17.90	10.49	56.81	0.14	7.07
Molo Lake	29.80	43.32	12.98	23.10	13.03	81.75	0.87	9.70
Fish Lake	38.14	51.35	12.39	27.04	16.86	94.48	0.54	11.17
North Lake	23.27	39.98	9.79	20.85	10.89	76.40	0.20	8.07
Shallow Lake	78.20	45.07	9.28	22.90	12.20	72.10	1.43	9.22
Banya 2 Lake	34.93	48.18	11.01	23.56	14.78	83.48	0.42	10.16
Banya 3 Lake	32.68	46.90	10.29	22.27	13.88	81.42	0.28	9.08
Banya Lake	30.44	46.82	10.78	23.27	13.57	84.41	0.40	9.15
Flood Lake	31.09	43.71	11.45	23.37	15.10	84.60	0.27	10.94
Max	78.20	51.35	13.61	26.79	16.86	94.48	1.43	11.17
Min	23.27	39.98	8.87	17.90	10.49	56.81	0.09	7.07
Average	35.74	44.77	11.05	23.11	13.70	79.66	0.46	9.57
Clark ¹	106.00	92.00	15.00	50.00	27.00	75.00	2.50	17.00
CV (%) ²	43	8	14	11	15	12	88	14

Note. ¹According to [20]; ² CV — coefficient of variation.

Fractionation of trace metals in the sediments

The percentage of different fractions of the metals, broken down into individual lakes, is presented in a set of bar plots (Fig. 2). Most of the metals are predominantly associated with residual compounds (fraction 5) in all the lake sediments studied. All the investigated elements were identified in organometallic complexes (fraction 3) and forms associated with Fe/Mn hydroxides (fraction 4). Fraction 4 is most significant for Cr and Zn in all the lakes, and also for Co in Lake 2, North Lake, Banya Lake, Molo Lake as well as Shallow Lake. For V, Ni, Sn, Pb, and Cu, this phase does not exceed 1–3 %.

Furthermore, all the metals analyzed were observed in specifically sorbed forms (fraction 2). Co, Cu, Cr, and Ni are mostly associated with this phase. In exchange forms (fraction 1) all the metals were also identified in all sediment samples. The exception was Zn. Its concentration in this phase was lower than LOD (Shallow Lake, Molo Lake, Flood Lake, and Fish Lake), did not exceed 1–3 % (Lake 1, North Lake, Banya Lake, Banya 2 Lake, and Banya 3 Lake) or was 10 % (Lake 2).

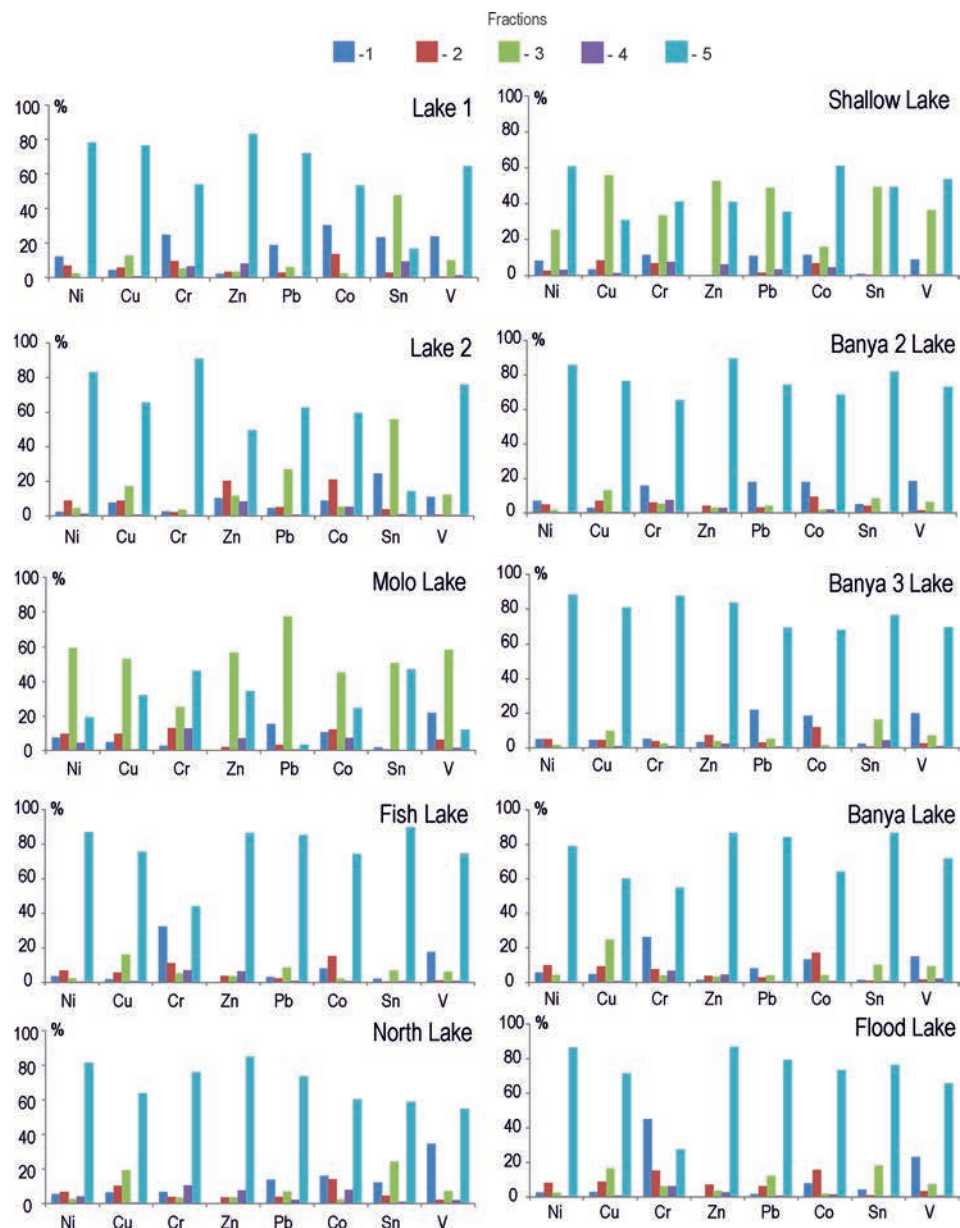


Fig. 2. The fractions of the metals (% of acid-soluble forms) in lake sediments of the Lena Delta: fraction 1 — exchangeable ions; fraction 2 — specifically sorbed; fraction 3 — organometallic complexes; fraction 4 — metals, associated with Fe/Mn hydroxides; fraction 5 — residual compounds

Рис. 2. Фракции металлов (% от кислоторастворимых форм) в озерных отложениях дельты Лены: фракция 1 — обменные ионы; фракция 2 — специфически сорбированная; фракция 3 — металлоорганические комплексы; фракция 4 — металлы, связанные с гидроксидами Fe/ Mn; фракция 5 — остаточные соединения

The assessment of the mobility of the elements is presented in a separate bar chart (Fig. 3). According to the RAC index, the risk of secondary pollution for Ni, Cu, Zn, Sn, and Pb does not exceed the medium level. However, for V a high level is shown in the sediments of North Lake; for Cr — in Banya 2 Lake, Lake 1, and Fish Lake; for Co — in Lake 1. Cr has a very high level of RAC (60 %) in the sediment of Flood Lake.

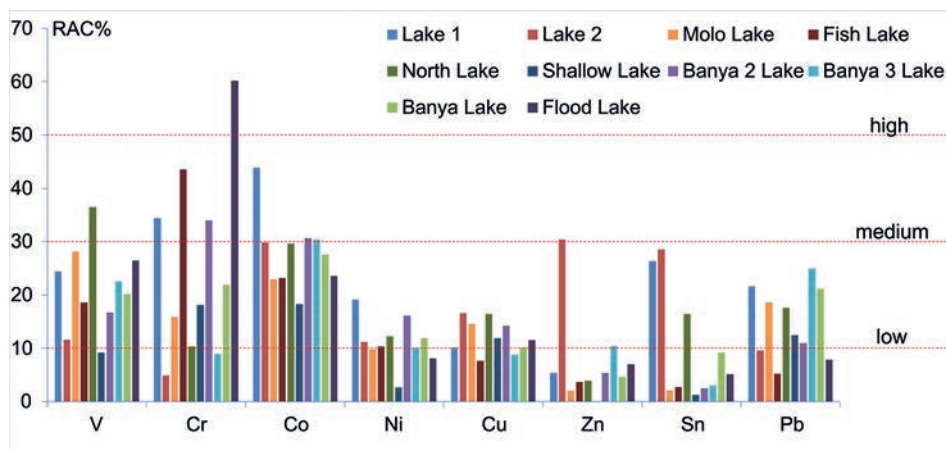


Fig. 3. RAC, (%) index — risk of secondary water pollution (sum of fractions 1 and 2). Red dotted lines indicate the level of the risk

Рис. 3. RAC (%) индекс — риск вторичного загрязнения (сумма фракций 1 и 2). Красная пунктирная линия демонстрирует уровень риска

DISCUSSION

The previous hydrochemical study in the Lena Delta revealed differences in the content of the main ions and some trace elements in the water of lakes that are characterized by different origin, flooding regimes and geological basement of the catchment area [3]. However, our work did not reveal any similar difference in the content of the majority of metals analyzed in the lake sediments. Furthermore, the elements are predominantly associated with residual compounds (crystal structure of the minerals). Therefore, the content of trace elements in all the lakes studied is determined by natural (lithogenic) sources [21]. The metals are distributed quite homogeneously in the sediments of different lakes from the area studied and the concentration of all the elements is either lower or at the same level compared to the clark values. Thus, Quaternary (Samoylov and Kurungnach Islands) and Neogene (Sardakh Island) deposits that constitute the catchment areas of the lakes studied have a similar geochemical composition. The trace elements entering with river water do not influence the total content of the trace elements in the sediments of different lakes. The pristine character of the Lena River water in terms of trace metal concentrations was revealed previously [22], but more recent data are limited. Also, it should be noted that the impact of Samoylov station on the accumulation of the trace elements in the lake sediments of the island was not observed.

The Lena Delta lakes studied were characterized by argillaceous sediments depleted in dispersed organic matter [11]. Despite this fact, stable organometallic compounds of the metals were identified in all the lakes studied (fraction 3). Humic acids of this fraction form stable chelate complexes with metals, reducing the potential bioavailability [23]. In this work, the phase is predominant in the sediments of Lake Molo and Shallow for most of the metals

analyzed both in relative and absolute content. However, previous research of the sediment humic acids of the lakes studied showed their generally low maturity degree and low potential complex-forming ability [11]. But among the water bodies studied, the molecules of the acids in Molo Lake and Shallow Lake are the most hydrophobic and resistant to oxidation. Thus, they can form relatively more stable compounds with metals. Generally, the formation of complex compounds of metal ions with organic substances (humic and fulvic acids) is one of the dominant mechanisms in their fixation in aquatic and terrestrial environments [11, 24, 25]. In our work, humic matter binds predominantly Cu, Sn, and Pb. Similar geochemical behavior of these elements was observed in the non-permafrost lakes of the other regions of the Arctic zone [11, 26]. However, the sediments in these lakes contain more organic matter which can bind up to 70–80 % of the total content of some metals.

Metals associated with hydrated oxides of Fe and Mn also belong to the most stable compounds. Fe/Mn oxides are significant absorbers of the metals [9, 25, 27] and can be present in sediments as nodules, cement, or films on solid particles. Metal ions of this fraction can enter the lake water when sediment conditions change into the reducing environment (Eh decrease). However, the role of the oxidized form of Fe and Mn in the sorption of trace metals in the lake sediments studied is low. It could be explained by the reducing conditions of the sediments. The presence of hydrotroilite (black inclusions) was noted in the sediments during the sampling (Table 1). This mineral $(\text{Fe}(\text{HS})(\text{OH}) \cdot x \text{H}_2\text{O})$ indicates the anoxic environment [28].

Fractions 1 and 2 are the most unstable. They are used to assess the potential mobility (bioavailability) of elements in aquatic ecosystems. Specific sorbed ions (fraction 2) are bonded with sediment components by non-ionic bonds (non-exchange form). Metals of this phase are part of the surface complexes and precipitates. The fraction also includes carbonate forms of metals and metals associated with labile organic matter. This type of compounds is in an intermediate position between the most mobile fractions (exchangeable) and relatively stable ones. The significance of this fraction for a number of elements is probably explained by the predominance of carbonate and terrigenous-carbonate rocks in geological formations of the Lena Delta and high hydrophilicity (lability) of humic molecules [11]. The metal ions of this fraction can desorb with pH decrease. The exchangeable forms (fraction 1) include the most mobile ions. The fraction is sensitive to changes of water ionic composition in terms of release of the metals in the water.

In general, some elements are characterized by high mobility because they are released as part of readily soluble compounds from the thawing permafrost of the catchment area or Lena river water during flooding. Furthermore, the high-oxygen (hydrophilic) humic acids of the sediments could form water-soluble complexes with metals [11]. This contributes to mobilization of the elements from the sediments.

CONCLUSION

The results of the study showed the relatively homogeneous distribution of the trace metals (V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Sn, and Pb) in the sediments of different lakes of the Lena Delta. Most of the elements are predominantly fixed in the lattice structure of residual minerals and stable organometallic compounds.

According to our fractional analysis of the metals and the results of previous research of humic acids, the organic matter and mineral components (hydrated Fe/Mn oxides) of the sediments studied have a relatively low potential ability to fix metals into stable complexes. Thus, if the trace elements enter into aquatic ecosystems as part of readily

soluble compounds, they can become bioavailable due to physical and chemical changes in the aquatic environment. Thus, there is a risk of secondary pollution of water from the sediments, and the most mobile elements are V, Cr, and Co.

Therefore, the geochemical results of this work reveal high sensitivity of the limnic system of the region to potential anthropogenic impact and climate change (releasing of chemical elements due to permafrost degradation). So, the data obtained can serve as reference values of trace metal concentration in sediments for further study of the permafrost-affected lakes of the region. Furthermore, the findings are important for developing a relevant monitoring system for the lakes of the Arctic zone.

Competing interests. No conflicts of interest involved.

Конфликт интересов. Конфликт интересов отсутствует.

Funding. Governmental Order to the Institute of Limnology RAS № 0154-2019-0003, “Development of integrated methods for studying and evaluating the characteristics of solid particles at nanoscale size in water bodies with different level of anthropogenic impact”; Governmental Order of the laboratory of geoeology and environmental management of the Arctic of INEP KSC RAS № 1021111018324-1.

Финансирование. Тема НИР Института озераведения РАН — СПб ФИЦ РАН № 0154-2019-0003 «Разработка комплексных методов изучения и оценка характеристик твердых частиц наноразмера в водоемах с разным уровнем антропогенного воздействия»; тема НИР Института проблем промышленной экологии севера КНЦ РАН № 1021111018324-1.

REFERENCES

1. Kokelj S., Jenkins R., Milburn D., Burn C.R., Snow N. The influence of thermokarst disturbance on the water quality of small upland lakes, Mackenzie Delta Region, Northwest Territories, Canada. *Permafrost Periglacial Processes*. 2005, 16 (4): 343–353. <https://doi.org/10.1002/ppp.536>.
2. Thompson D., Woo M. Seasonal hydrochemistry of a high Arctic wetland complex. *Hydrological Processes*. 2009, 23: 1397–1407. doi: 10.1002/hyp.7271.
3. Chetverova A., Skorospekhova T., Morgenstern A., Alekseeva N., Spiridonov I., Fedorova I. Hydrological and hydrochemical characteristics of lakes in the Lena River delta (Northeast-Siberia, Russia). *Polarforschung*. 2017, 87 (2): 111–123. doi: 10.2312/polarforschung.87.2.111.
4. Morgenstern A., Grosse G., Schirrmeister L. Genetic, morphological, and statistical characterization of lakes in the permafrost-dominated Lena Delta, Fairbanks, Alaska. D.L. Kane eds. *Permafrost. Proceedings of the 9th International Conference on Permafrost*, Institute of Northern Engineering, University of Alaska, Fairbanks, 2008: 1239–1244.
5. Tessier A. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analytical Chemistry*. 1979, 51(7): 844–851. <https://doi.org/10.1021/ac50043a017>.
6. Li X., Shen Z., Wai O., LI Y. S. Chemical forms of Pb, Zn and Cu in the sediment profiles of the Pearl River Estuary. *Marine Pollution Bulletin*. 2001, 42: 215–223. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(00\)00145-4](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(00)00145-4).
7. Moore F., Nematollahi M., Keshavarzi B. Heavy metals fractionation in surface sediments of Gowatr bay–Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2015, 187 (1): 4117. doi: 10.1007/s10661-014-4117-7.
8. Slukovskii Z. Background concentrations of heavy metals and other chemical elements in the sediments of small lakes in the south of Karelia, Russia. *Vestnik of MSTU*. 2020, 23 (1): 80–92. doi: 10.21443/1560-9278-2020-23-1-80-92.

9. Guzeva A., Slukovskii Z., Dauvalter V., Denisov D. Trace element fractions in sediments of urbanised lakes of the arctic zone of Russia. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2021, 193: 378. doi: 10.1007/s10661-021-09166-z.
10. Thouni A., Angelone M., Armiento G., Caprioli R., Crovato C., De Cassan M., Montereali M.R., Nardi E., Parella L., Proposito M., Spaziani F., Zourarah B. Assessment of Trace Metals in Sediments from Khnifiss Lagoon (Tarfaya, Morocco). *Earth*. 2021, 2: 16–31. <https://doi.org/10.3390/earth2010002>.
11. Guzeva A., Krylova E., Fedorova I. Environmental aspects of molecular composition of humic acids isolated from lake sediments of a permafrost-affected area of the Arctic. *Polish Polar Research*. 2021, 42 (3): 173–191. doi: 10.24425/ppr.2021.137142.
12. Grigor'ev M.N. *Kriomorfogenez ust'evoy oblasti r. Leny*. Cryomorphogenesis of the estuarine region of the river Lena. Yakutsk: SO RAN, 1993: 175 p. [In Russian].
13. Schwamborn G., Andreev A., Tumskey V., Rachold V., Grigoriev M., Pavlova E., Dorozhkhina M., Hubberten H. Evolution of Lake Nikolay, Arga Island, western Lena River delta, during late Weichselian and Holocene time. *Polarforschung*. 2002, 70: 69–82.
14. Morgenstern A., Grosse G., Günther F., Fedorova I., Schirrmeister L. Spatial analyses of thermokarst lakes and basins in Yedoma landscapes of the Lena Delta. *The Cryosphere*. 2011, 5: 849–867. <https://doi.org/10.5194/tc-5-849-2011>.
15. Bol'shiyanov D.Yu., Makarov A.S., Shnajder V., Shtof G. *Proiskhozhdenie i razvitie del'ty reki Leny*. Origin and development of the delta of the river Lena. St. Petersburg: AARI, 2013: 268 p. [In Russian].
16. FGBU VSEGEI 2014. Governmental geological map of the Russian Federation. Map of Quaternary deposits. S-51, S-52: 1:1000000, Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation. Available at: <http://webmapget.vsegei.ru/index.html> (accessed 18.01.2022).
17. Swarnalatha K., Letha J., Ayoob S., Rachold V., Grigoriev M., Pavlova E., Dorozhkhina M., Hubberten H. Risk assessment of heavy metal contamination in sediments of a tropical lake. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2015, 187: 322. doi: 10.1007/s10661-015-4558-7.
18. Wedepohl K.H. The composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59 (7): 1217–1232.
19. Passos E., Alves J., Garcia C., Costa A.S. Metal fractionation in sediments of the Sergipe River, northeast, Brazil. *J. Brazil. Chem. Soc.* 2011, 22 (5): 811–1004. <https://doi.org/10.1590/S0103-50532011000500004>.
20. Wedepohl K. The composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1995, 59 (7): 1217–1232. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00038-2](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00038-2).
21. Lin J., Rayhan A. S., Wang Y., Wu Z., Lin Y., Ke H., Li T., Chen K., Cai M. Distribution and contamination assessment of heavy metals in soils and sediments from the Fildes Peninsula and Ardley Island in King George Island, Antarctica. *Polar Research*. 2021, 40. doi:10.33265/polar.v40.5270.
22. Guieu C., Huang W. W., Martin J.-M., Yong Y.Y. Outflow of trace metals into Laptev Sea by the Lena River. *Marine Chemistry*. 1996, 53(3–4): 255–267. [https://doi.org/10.1016/0304-4203\(95\)00093-3](https://doi.org/10.1016/0304-4203(95)00093-3).
23. Dong Y., Lin H., Zhao Y., Menzembere E. Remediation of vanadium-contaminated soils by the combination of natural clay mineral and humic acid. *Journal of Cleaner Production*. 2021, 279: 123874. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123874>.
24. Lopez D., Gierlowski-Kordesch E., Hollenkamp C. Geochemical mobility and bioavailability of heavy metals in a lake affected by acid mine drainage: Lake Hope, Vinton County, Ohio. *Water, Air & Soil Pollution*. 2010, 213: 27–45.
25. Slukovskii Z.I. Accumulation level and fractions of heavy metals in sediments of small lakes of the urbanized area (Karelia). *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Nauki o Zemle*. Vestnik

of Saint Petersburg University. Earth Sciences. 2020, 65 (1): 171–192. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2020.109> [In Russian].

26. Slukovskii Z. I., Dauval'ter V.A. Features of Pb, Sb, Cd accumulation in sediments of small lakes in the south of the Republic of Karelia. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN*. Transactions of Karelian Research Centre of Russian Academy of Science. 2020, 4: 75–94. [In Russian].

27. Turner A. Trace metal contamination in sediments from UK estuaries: an empirical evaluation of the role of hydrous iron and manganese oxides. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2000, 50 (3): 355–371. <https://doi.org/10.1006/ecss.1999.0573>.

28. Derkachev A., Nikolaeva N., Mozherovsky A., Grigor'eva T.N., Ivanova E. D., Pletnev S.P., Barinov N.N., Chubarov V.M. Mineralogical and Geochemical Indicators of Anoxic Sedimentation Conditions in Local Depressions within the Sea of Okhotsk in the Late Pleistocene-Holocene. *Russian Journal of Pacific Geology*. 2007, 1 (3): 203–229. doi: 10.1134/S1819714007030013.

Фракции металлов в отложениях озер зоны многолетней мерзлоты севера Сибири, дельта р. Лены

А.В. Гузева^{1*}, И.Р. Елизарова², А.Е. Лапенков¹, З.И. Слуковский²

¹ — Институт озераедения РАН — СПб ФИЦ РАН, Санкт-Петербург, Россия

² — Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, Анапиты, Россия

*olina2108@mail.ru

Резюме

Цель исследования — оценка роли компонентов донных отложений в накоплении микроэлементов в озерах криолитозоны (дельта Лены, северная Сибирь). Проведен фракционный анализ некоторых микроэлементов (V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Sn, Pb). Пробы были отобраны из 10 озер в летний период экспедиции «ЛЕНА 2019». Содержание химических элементов в осадках измеряли прибором ICP-MS. Результаты работы показали относительно однородное распределение кислоторастворимых форм металлов в донных отложениях разных озер. Большинство элементов преимущественно закреплено в устойчивых минеральных и металлоорганических соединениях. Однако для V, Co и Cr в некоторых озерах отмечен высокий уровень подвижности. Металлы растворимых комплексов способны мигрировать из донных отложений в воду за счет изменений физико-химических параметров водной среды. Кроме того, органические и минеральные вещества осадков обладают низкой потенциальной способностью связывать металлы в устойчивые соединения.

Ключевые слова: дельта Лены, многолетняя мерзлота, озерные отложения, Сибирь, фракции металлов.

Для цитирования: Guzeva A.V., Elizarova I.R., Lapenkov A.E., Slukovskii Z.I. Fractions of trace metals in the sediments of permafrost-affected lakes in Northern Siberia, Lena delta // Проблемы Арктики и Антарктики. 2022. Т. 68. № 2. С. 160–172. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-2-160-172>.

Поступила 30.05.2022

После переработки 15.06.2022

Принята 16.06.2022

Фракции металлов в отложениях озер зоны многолетней мерзлоты севера Сибири, дельта р. Лены (расширенный реферат)

Дельта р. Лены располагается на севере Сибири в области развития многолетней мерзлоты. На данной территории сосредоточено большое количество озер, на гидрологические и гидрохимические особенности которых преимущественно влияют поверхностные стоки с водосборных площадей, подземные воды сезонно-талого слоя, а также паводковый режим реки Лены. Кроме того, химические элементы могут мигрировать в воды озер из многолетнемерзлых отложений, подстилающих котловину озера, из-за

протекающих на территории термокарстовых процессов. Так как донные отложения представляют собой терминальную матрицу накопления химических веществ в аквальных экосистемах, их комплексные геохимические исследования необходимы для понимания процессов аккумуляции и миграции микроэлементов в криолитозоне.

Цель работы — оценка роли органических и минеральных компонентов озерных отложений в накоплении микроэлементов (V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Sn, Pb). В задачи исследования входил анализ всего спектра фракций металлов в пробах донных осадков.

Донные отложения были отобраны из 10 малых озер трех островов дельты р. Лены, которые характеризуются различным геологическим строением и режимом затопления речными водами. Кроме того, при выборе объектов исследования были приняты во внимание основные типы озер территории: небольшие полигональные, глубокие термокарстовые и старичные озера. Были исследованы следующие формы нахождения металлов: обменные ионы (фракция 1); специфически сорбированные металлы (фракция 2); металлоорганические комплексы (фракция 3); металлы, связанные с гидратированными оксидами Fe и Mn (фракция 4); остаточная (устойчивая) фаза (фракция 5), рассчитанная путем вычитания суммы предыдущих четырех фракций из содержания кислоторастворимых форм элемента.

В результате сравнения концентраций кислоторастворимых форм металлов в отложениях разных озер было показано, что четвертичные и неогеновые отложения, слагающие водосборы водных объектов, характеризуются сходным геохимическим составом. Кроме того, процесс затопления озер речными водами не влияет на валовое содержание металлов в донных осадках озер. Следует также отметить, что, по полученным данным, воздействия функционирования научной станции о. Самойловский на накопление микроэлементов в озерных отложениях острова не наблюдается.

Результаты фракционного анализа свидетельствуют о том, что металлы в донных отложениях преимущественно связаны с кристаллической структурой минералов, попадающих в озера с водосборных бассейнов. Следовательно, содержание микроэлементов в озерах определяется природными (литогенными) источниками.

Глинистые отложения изученных озер характеризуются невысокими содержаниями рассеянного органического вещества, тем не менее металлы в органической фракции были идентифицированы во всех пробах. Устойчивые (хелатные) органоминеральные соединения являются особенно важной формой металлов в отложениях двух озер, характеризующихся наиболее зрелыми (конденсированными) молекулами гумусовых кислот. В осадках других озер преобладают алифатические гидрофильные гуминовые кислоты, которые способны образовывать легкорастворимые комплексы и соли с металлами, мобилизуя элементы из отложений. Роль гидратированных оксидов Fe и Mn в сорбции микроэлементов в отложениях исследованных озер невелика, что можно объяснить восстановительными (бескислородными) условиями среды.

В некоторых озерах была выявлена высокая потенциальная геохимическая подвижность (биодоступность) V, Cr и Co. Обменные и специфически сорбированные формы металлов переходят в водную толщу даже при незначительных изменениях физико-химических параметров среды. Наличие данных неустойчивых форм может быть связано, с одной стороны, с изначальным попаданием металлов в экосистему озера в составе легкорастворимых соединений из оттаивающих многолетнемерзлых пород водосбора или с речными водами р. Лены при половодье. С другой стороны, гумусовое вещество и гидратированные оксиды Fe/Mn исследованных отложений, как показывают результаты, обладают низкой потенциальной способностью связывать металлы в нерастворимые комплексы.

Полученные данные могут служить референтными значениями концентрации V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Sn, Pb в донных отложениях озер и необходимы для оценки роли гумусового вещества в накоплении и миграции металлов в озерах региона в условиях меняющегося климата (деградация многолетней мерзлоты). Кроме того, результаты работы важны для разработки научно обоснованной системы мониторинга озер Арктической зоны РФ.

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-2-173-190>
УДК 556.55



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

Районирование Арктической зоны РФ как основа разработки системы наблюдений за пресными водами

В.А. Румянцев¹, А.В. Измайлова^{2*}

¹ — Санкт-Петербургский научный центр Российской академии наук,
Санкт-Петербург, Россия

² — Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург, Россия

*ianna64@mail.ru

Резюме

Обосновывается необходимость создания программы облегченных исследований на малых озерах и реках Арктической зоны РФ, крайне многочисленных и чрезвычайно уязвимых к различным видам антропогенного воздействия. При создании сети таких наблюдений основное внимание должно уделяться не состоянию конкретных объектов, а выявлению негативных трендов в различных частях АЗ РФ с целью своевременного предупреждения масштабных катастроф с пресными водами. В основу создания сети предлагается положить принцип ландшафтно-гидрологического районирования, учитывающего как генезис формирования водных объектов, так и особенности функционирования водных экосистем.

Ключевые слова: Арктическая зона, ландшафтно-гидрологическое районирование, малые реки, озерный фонд, сеть гидрологических и лимнологических наблюдений.

Для цитирования: Румянцев В.А., Измайлова А.В. Районирование Арктической зоны РФ как основа разработки системы наблюдений за пресными водами // Проблемы Арктики и Антарктики. 2022. Т. 68. № 2. С. 173–190. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-2-173-190>.

Поступила 17.05.2022

После переработки 11.06.2022

Принята 17.06.2022

Zoning of the Arctic zone of the Russian Federation as the basis for the development of a fresh water observation system

Vladislav A. Rumyantsev¹, Anna V. Izmailova^{2*}

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

² — State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia

*ianna64@mail.ru

Summary

Solving the problem of developing the Arctic zone of the Russian Federation without causing irreparable damage to the environment requires monitoring its various components. The article discusses the need to create a network of systems for the observation of the state of water resources in the polar regions. It is shown that, along

with the existing monitoring system for large water bodies and streams, it is necessary to create a program of facilitated research on small lakes and rivers, which are extremely numerous within the Arctic zone and extremely vulnerable to various types of anthropogenic impact. In developing a network of such observation systems, the main attention should be paid not to the state of specific objects, but to identifying negative trends in various parts of the Russian Arctic zone in order to timely prevent large-scale fresh waters disasters. It is proposed that the creation of the network should be based on the principle of landscape-hydrological zoning, which takes into account both the genesis of water bodies and the specific features of the functioning of aquatic ecosystems. After the zoning of the territory of the Russian Federation Arctic Zone is completed, it is recommended that observations be carried out at reference water bodies located within all the selected regions, taking into account landscapes, both at the regional and, in the case of a significant scale of anthropogenic impact, at the local level. Along with general observations that need to be carried out at all points, which will make it possible to obtain data on the features of hydrological and in-lake processes in various parts of the Arctic zone and compare their course, it is also necessary to develop special observations. The latter, developed within each selected region, must meet the requirements for identifying the features of regional processes and information support for mathematical modeling of emergency situations and the ecological crisis caused by the main types of anthropogenic activity. The information obtained on reference lakes and streams of a hydrological region may reveal negative processes occurring throughout its area and indicate the need for emergency measures.

Keywords: Arctic zone, hydrological zoning, lake fund, network of hydrological and limnological observations, small rivers.

For Citation: Rumyantsev V.A., Izmailova A.V. Zoning of the Arctic zone of the Russian Federation as the basis for the development of a fresh water observation system. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2022, 68 (2): 173–190. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-2-173-190>.

Received 17.05.2022

Revised 11.06.2022

Accepted 17.06.2022

ВВЕДЕНИЕ

Стратегией развития Арктической зоны Российской Федерации (АЗ РФ) до 2035 года намечено широкомасштабное хозяйственное освоение северных регионов [1], оборотной стороной которого явится резкое усиление антропогенного пресса на природную среду и, в силу этого, возможное серьезное ухудшение ее экологического состояния. При этом наибольшую и трудно устранимую угрозу представляет масштабное пространственное загрязнение, вызванное техногенным переносом опасных веществ от горнодобывающих, горноперерабатывающих и металлургических предприятий, которое распространяется на большие расстояния и одновременно охватывает огромные территории. Планами промышленного освоения АЗ РФ предусматривается дальнейшее расширение существующих производств и строительство новых минерально-сырьевых центров, что обострит в ряде регионов и без того напряженную экологическую ситуацию. Большую угрозу крупного пространственного загрязнения территорий представляет также интенсивное развитие нефтяных и газовых промыслов в целом ряде арктических регионов. Достаточно напомнить о последствиях крупнейшего разлива нефтепродуктов в мае 2020 г. на ГМК «Норильский никель», а также об аварии на нефтепроводе в 1994 г. в г. Усинске, Республика Коми.

Следует напомнить, что в директивных документах по развитию Арктической зоны подчеркивается необходимость промышленного освоения территорий без нанесения непоправимого вреда природной среде. Чтобы, в условиях интенсивного освоения, обеспечить выполнение данного положения, необходима «обратная связь» между ростом антропогенной нагрузки, происходящей в условиях наблюдающегося потепления климата, и реакцией различных составляющих природной среды на производимое антропогенное воздействие. Такая связь может быть обеспечена лишь за счет построения на территории АЗ РФ сети станций контроля за трен-

дом в ее состоянии. Заметим, что при организации сети для каждой составляющей природной среды (воздушной, водной, растительной, почвенной) потребуется свой индивидуальный подход.

В рамках настоящей статьи остановимся на одной из важнейших составляющих природной среды, а именно — пресных водах, запасы которых определяют как жизнедеятельность человека, так и возможности экономического развития регионов. И поставим своей задачей обоснование необходимости создания сети специальных наблюдений на водоемах и водотоках арктических территорий, разработка которой может основываться на принципах ландшафтно-гидрологического районирования.

ИСХОДНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА

Арктические регионы России характеризуются богатством водных ресурсов, включающих сток рек и запасы озерных вод. Однако по мере освоения северных регионов качество поверхностных вод неуклонно ухудшается. К настоящему времени большинство крупнейших рек, впадающих в моря Северного Ледовитого океана, характеризуется 2–4-м классом загрязненности (от слабо загрязненной до грязной и очень грязной). Они являются загрязненными уже на входе в Арктическую зону, поскольку собирают стоки с полей и предприятий, расположенных в наиболее освоенных центральных и южных регионах страны. Низким качеством воды отличается и целый ряд рек, бассейны которых полностью лежат в пределах Арктической зоны. Так, воды наиболее крупных рек Кольского полуострова, активное хозяйственное освоение которого началось еще в первой половине XX в., характеризуются в диапазоне от загрязненных до экстремально загрязненных [2]. Наряду с речными водами, ухудшение качества воды характерно и для многих арктических озер. Согласно оценке [3, 4], во всех субъектах Российской Федерации, расположенных в пределах АЗ РФ, преобразования, происходящие в озерных системах, пока еще охватывают менее половины водоемов, однако на целом ряде больших озер они квалифицируются уже как чрезвычайно опасные.

Крупные реки и озера отличаются большим разнообразием формирующих их природных и антропогенных факторов и, в силу этого, мозаичностью экологического состояния и качества воды в различных частях водного объекта. Контроль за их состоянием в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 10 апреля 2007 г. № 219 «Об утверждении Положения об осуществлении государственного мониторинга водных объектов» (ред. от 18.04.2014) возложен на Федеральное агентство водных ресурсов, Федеральную службу по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Федеральное агентство по недропользованию, Федеральную службу по надзору в сфере природопользования, Федеральные органы исполнительной власти и органы исполнительной власти субъектов РФ, которые проводят его совместно в пределах закрепленных за ними функциональных обязанностей [5]. Вместе с тем подавляющее большинство рек и озер в Арктической зоне по существующей классификации относятся к классу малых водных объектов и небольшая часть — к классу средних [6, 7]. Эти водные объекты совершенно не охвачены регулярными наблюдениями, при том что они, в силу своей слабой устойчивости к антропогенным воздействиям и потеплению климата, могут быть подвержены наиболее сильным негативным изменениям.

В работе [4] дан предварительный качественный прогноз возможного положения дел с экологическим состоянием небольших арктических озер при существующих планах развития регионов. Отмечено, что в большинстве арктических районов

следует ожидать появления более масштабного антропогенного пресса и, по этой причине, — быстрого ухудшения экологического состояния водоемов, которое может заметно отразиться на жизнедеятельности людей и представителей животного мира. Для некрупных водных объектов это может привести к пагубным последствиям. Вместе с тем было бы ошибкой недооценивать значение таких объектов как источников пресной воды и природоформирующего фактора. Их роль при реализации планов развития отдельных регионов, несомненно, велика, и сохранение качества пресных вод небольших водоемов и водотоков является важной социальной задачей.

Чтобы избежать в будущем появления обширных территорий с множеством водных объектов, фактически загубленных как источник воды для представителей животного мира и опасных для здоровья людей [3], необходимо иметь систему регулярного контроля за их состоянием. При огромной территории АЗ РФ, множестве расположенных на ней водоемов и водотоков и в то же время при малочисленности населения и слабых коммуникационных связях, создание сети мониторинга, который чаще всего воспринимают как систему наблюдений для принятия оперативных решений, является крайне сложным и дорогостоящим мероприятием. Однако применительно к небольшим водным объектам такая оперативная система и не требуется. Нас в данном случае должно интересовать не положение дел с отдельными объектами, а негативные изменения экологического состояния пресных вод Арктической зоны, происходящие в течение длительного времени на обширных территориях, которые способны спровоцировать масштабные необратимые изменения и других компонентов природной среды. Поэтому здесь необходима система наблюдений по сути своей стратегического характера, задача которой будет прежде всего заключаться в своевременном получении данных о некотором обобщенном по площади показателе, свидетельствующем об ухудшении состояния пресных вод на рассматриваемой территории и возникновении опасной ситуации. Достижение критических значений исследуемых параметров реперных водоемов и выявление негативных трендов для обобщенного показателя изменения водной среды, разработанного для конкретного региона, будут свидетельствовать о приближении экологической катастрофы всей природной среды, а наличие такой информации послужит обоснованием для постановки вопроса о необходимости осуществления соответствующих природоохранных мер. Последние могут включать как модернизацию технологических процессов на отдельных предприятиях, так и возможную корректировку планов промышленного освоения той или иной территории с тем, чтобы избежать дальнейшего роста угрозы социально-экономическому развитию АЗ РФ регионального или даже межрегионального масштабов.

Таким образом, исходя из вышесказанного, единственно возможное решение сформулированной задачи состоит в отказе от идеализированного представления о всеобъемлющем мониторинге и переходе к рассмотрению укрупненной и реально осуществимой системы, достаточной для получения вполне приемлемых результатов с позиции предупреждения масштабных катастроф с пресными водами Арктической зоны. Очевидно, что при построении системы наблюдений за пресными водами АЗ РФ стратегической направленности наиболее разумным явится подход, в основу которого будет положено ландшафтно-гидрологическое районирование территории, учитывающее как генезис формирования водных объектов и особенностей функционирования их экосистем, так и воздействие на них антропогенных факторов. В этом случае можно ожидать, что различия в величинах важнейших показателей пресных вод внутри каждого района будут в среднем существенно меньше, чем при сравнении их с показателями других районов. Это дает основание говорить об

условной гидрологической однородности района и возможности переносить обобщенные величины показателей, полученные по данным наблюдений на выбранных реперных водных объектах, на всю площадь района. За основную стратегическую пространственную единицу при организации системы наблюдений за пресными водами малых рек и озер в АЗ РФ естественно принять условно однородный ландшафтно-гидрологический район.

Для того чтобы негативные изменения водной среды не только фиксировались на единичных объектах, расположенных в непосредственной близости к источникам загрязнения в пресных водах, но и оказывали воздействие на удаленные объекты конкретного региона, требуется определенное время, поэтому отпадает необходимость частых регулярных наблюдений на реперных объектах и важное значение приобретает вопрос об индикаторе происходящих изменений, отвечающем поставленной в рамках исследования конечной цели. В работе [4] в качестве наиболее объективного индикатора для поверхностных вод было предложено использовать природно-ресурсный потенциал водных объектов, который для рек включает ресурсы воды должного качества, а также биологические, прежде всего рыбные ресурсы, а для озер, наряду с ними, также и запасы сапропеля. Ресурсная оценка, с одной стороны, определяет возможность хозяйственно-питьевого использования водных объектов, а с другой — необходима при расчетах ущерба, позволяя установить реальную эффективность хозяйственного освоения регионов.

Слабая изученность средних и малых рек и озер Арктической зоны практически исключает использование при ландшафтно-гидрологическом районировании территории морфометрических характеристик водных объектов и рядов наблюдений на гидрологических постах Росгидромета. Требуемая морфометрическая информация может быть частично восполнена данными космических съемок. Кроме того, дополнительная информация о сходстве водных объектов в пределах определенной территории может быть получена при анализе ландшафтных, геоморфологических и геологических карт.

Геологическая структура и геологическая история, относящиеся к аazonальным факторам, определяют генезис озерных котловин, а также особенности скульптурных форм рельефа, формирующих типологический облик водных объектов, и во многом предопределяют происходящие в водных экосистемах процессы. Функционирование водных экосистем находится в зависимости также и от зональных факторов, среди которых особая роль принадлежит климатическим. Интегральной характеристикой зональных и аazonальных факторов может служить принадлежность к тому или иному типу ландшафта. Водные объекты, расположенные в схожих ландшафтах, чаще всего характеризуются сходством функционирования их экосистем, а также реакции на внешнее воздействие (как частный случай — на антропогенную нагрузку). Настоящее утверждение относится прежде всего к объектам малого и среднего размера, которые отличаются и наиболее быстрым реагированием на антропогенный пресс. Данный факт представляется важным при планировании сети наблюдений за водными объектами, поскольку позволяет, используя метод аналогии, распространить информацию, полученную при изучении ограниченного количества водных объектов, на близлежащую территорию. При этом корректность распространения информации во многом будет определяться правильностью выбора реперных объектов, который, в свою очередь, может опираться на накопленный в гидрологии успешный многолетний опыт использования метода аналогии. Еще раз подчеркнем, что наиболее крупные водные объекты, собирающие сток с обширного водосбора,

характеризующегося мозаичностью ландшафтов, обычно выпадают из каких-либо классификаций. Их водная масса в порядки больше, чем у малых и средних объектов, в силу чего реакция на изменение внешних условий замедлена. Анализ происходящих в крупнейших водоемах процессов всегда требует индивидуального рассмотрения.

После выполнения ландшафтно-гидрологического районирования территории АЗ РФ наблюдения рационально проводить на реперных водных объектах, расположенных в пределах всех выделенных регионов, с учетом ландшафтов как регионального, так и, в случае значительного масштаба антропогенного воздействия, — локального уровня. Это позволит не только выявить изменения, происходящие на водных объектах в связи с определенным характером хозяйственной деятельности, но и отследить особенности реакции на схожие виды воздействия водных экосистем, расположенных в различных физико-географических условиях. Последнее, бесспорно, требует организации наблюдений, которые бы проводились с периодической частотой в одних и тех же пунктах и на основе единой разработанной программы.

В основу ландшафтно-гидрологического районирования на региональном уровне, приведенного далее, наряду со схожестью различных характеристик ландшафта, положена общность геологической структуры, в значительной степени определяющая генезис формирования водных объектов. Необходимо заметить, что тот или иной тип геологических структур, имея собственную историю формирования, обладает и специфической металлогенией, то есть с ним связаны месторождения тех или иных ископаемых. К горным регионам и древним щитам приурочены рудные полезные ископаемые, тогда как в осадочных породах предгорных прогибов и платформ находятся месторождения углеводородного сырья. На уровне локальных геологических структур к антиклинальным складкам тяготеют залежи нефти и газа, в синклинальных складках (мульдах) могут формироваться пласты оолитовых железных руд. Как результат, в Арктической зоне, где освоение различных видов природных ископаемых является основным видом антропогенного воздействия, принадлежность к геологической структуре во многом будет предопределять и основной вид хозяйственного воздействия (извлечение горючих, металлических или неметаллических ископаемых с их дальнейшей переработкой). В силу сказанного выделяемые регионы будут чаще всего характеризоваться общностью как генезиса водных объектов, так и специфики антропогенного пресса (кардинально различается загрязнение вод, связанное с добычей рудных или же углеводородных ископаемых). То есть внутри выделенного региона основные антропогенные факторы, приводящие к изменениям водных экосистем, чаще всего окажутся схожими.

РАЙОНИРОВАНИЕ АЗ РФ

С учетом проведенного ландшафтно-гидрологического районирования в пределах Арктической зоны выделены 9 основных регионов (рис. 1). Внутри регионов могут отмечаться различия по ряду компонентов природной среды на уровне экосистем локального уровня, однако по основным компонентам, таким как геология и климат, наблюдается определенное единство. Существующая пестрота отдельных природных составляющих внутри региона в свою очередь может учитываться за счет его внутренней детальной классификации, проведенной с учетом основных морфоскульптур рельефа, которые во многом определяют типологию речных русел и озерных котловин. Однако подробная детализация имеет особый смысл лишь в случае масштабности антропогенного воздействия, которое пока отмечается не во всех выделенных регионах АЗ РФ.

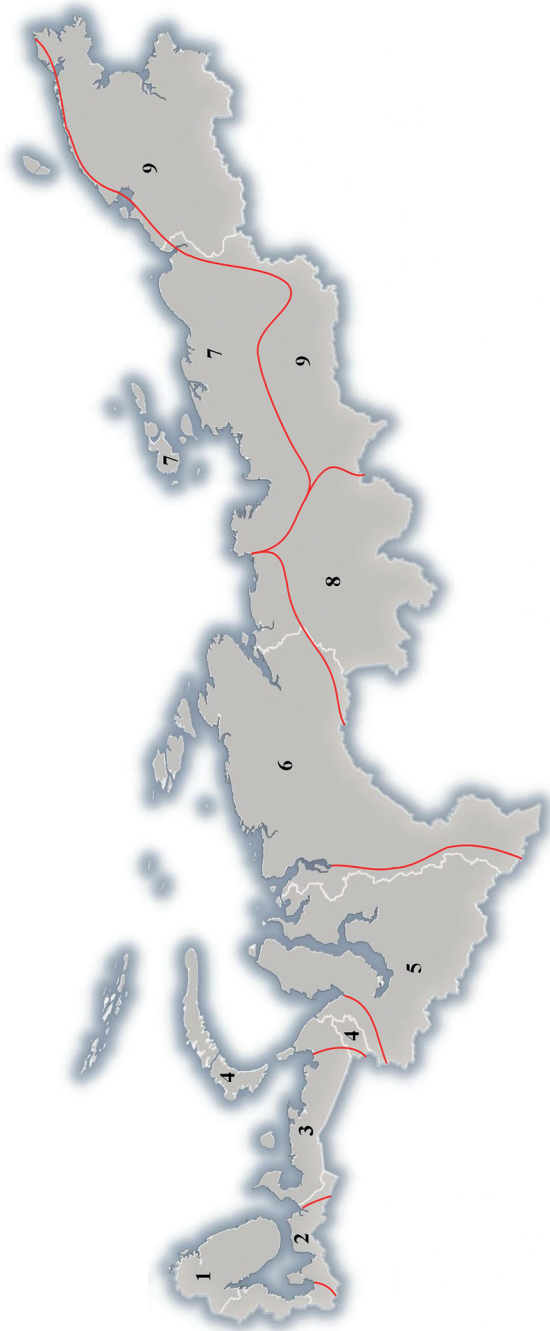


Рис. 1. Регионы АЗ РФ

1 — регион включает Кольский полуостров, северную часть Карелии; 2 — регион включает север Архангельской области; 3 — регион включает Ненецкий автономный округ и небольшие части Архангельской области и Республики Коми; 4 — регион включает северную часть Уралско-Новоземельской горной страны; 5 — регион включает равнинные районы на севере Западной Сибири; 6 — регион включает север Средней Сибири; 7 — регион включает север Северо-Восточной Сибири; 8 — регион расположен в пределах Среднесибирского плоскогорья; 9 — регион включает горные области Северо-Восточной Сибири

Fig. 1. Regions of Arctic zone of Russian Federation

1 — the region includes the Kola Peninsula, the northern part of Karelia; 2 — the region includes the north of the Arkhangelsk region; 3 — the region includes the Nenets Autonomous Okrug and small parts of the Arkhangelsk region and the Komi Republic; 4 — the region includes the northern part of the Ural-Novaya Zemlya mountainous country; 5 — the region includes plain areas in the north of Western Siberia; 6 — the region includes the north of Central Siberia; 7 — the region includes the north of northeastern Siberia; 8 — the region is located within the Central Siberian Plateau; 9 — the region includes the mountainous regions of North-Eastern Siberia

В пределах европейской части АЗ РФ, согласно генетическому принципу, выделяются 3 региона. Первый включает Кольский полуостров, часть материка, к которой он примыкает, а также северную часть Карелии. Весь регион находится на территории Балтийского кристаллического щита, характеризуется высоким коэффициентом озерности и сосредоточением большого количества крупных водоемов, преимущественно ледникового и ледниково-тектонического происхождения. Речная сеть густая, участки крутого падения русел чередуются с плесами, течение на которых значительно замедляется. Многие реки берут начало из крупных озер и, несмотря на небольшую длину, несут в себе много воды. Регион включает Мурманскую область и три муниципальных образования Республики Карелия, отнесенные к АЗ РФ, а также небольшую часть Архангельской области. Более подробная регионализация требует выделения 5 самостоятельных подрайонов:

1. Моренные и водно-ледниковые аккумулятивные равнины последнего оледенения (центр и восток Кольского полуострова).
2. Горная часть Кольского полуострова (центр полуострова, экзарационно-нижальные и аккумулятивные формы рельефа).
3. Прибрежные равнины Баренцева моря с преобладанием экзарационных форм рельефа; область распространения участков вечной мерзлоты (северо-восток полуострова).
4. Прибрежные равнины Белого моря, на которых преобладают экзарационные формы рельефа; область отсутствия вечной мерзлоты (юг полуострова).
5. Моренные и водно-ледниковые аккумулятивные равнины последнего оледенения (в т. ч. в пределах северной части Карельского сегмента Балтийского кристаллического щита).

Освоение первого региона прежде всего связано с разработкой ресурсов металлургических полезных ископаемых. Необходимо подчеркнуть, что это наиболее изученный в гидрологическом отношении регион АЗ РФ, по которому накоплены данные о функционировании водных экосистем различного генезиса и размера. Практически по всем выделенным подрайонам можно достаточно легко определить реперные объекты, в том числе из ранее исследованных, пусть даже эпизодически.

Сразу за пределами Балтийского кристаллического щита при выходе на Русскую равнину значения коэффициента озерности резко снижаются, в том числе на прибрежных равнинах Белого моря, затронутых валдайским оледенением. Речная сеть густая, характеризующаяся множеством водотоков низкого порядка. С учетом общности процессов лимногенеза, а также особенностей формирования гидрологической сети данные территории имеет смысл выделить во 2-й ландшафтно-гидрологический регион, включающий муниципальные образования севера Архангельской области, входящие в АЗ РФ. В его пределах имеет смысл выделить два самостоятельных подрайона:

1. Моренные, водно-ледниковые аккумулятивные и ледниково-озерные равнины последнего оледенения.
2. Морские аккумулятивные равнины Белого моря.

Гидрологическая и лимнологическая изученность второго региона слабее, чем первого, что отчасти вызвано и меньшей антропогенной нагрузкой на его водоемы и водотоки. Главным районом современной хозяйственной активности является устье Северной Двины, где сосредоточена большая часть предприятий Архангельской области. Существующие планы экономического развития сфокусированы на строительстве новых предприятий и модернизации порта в пределах данной, относительно небольшой части Архангельской области. В рассматриваемом регионе также не

сложно наметить реперные водные объекты, в том числе из ранее исследованных, расположенных в непосредственной близости к устью Северной Двины.

Значительно отличается по лимногенезу, а также по рисунку гидрографической сети территория, отнесенная к третьему региону, расположенному на северо-восточной окраине Русской плиты. Административно это территория Ненецкого автономного округа и небольшие части Архангельской области и Республики Коми. Регион характеризуется повсеместным распространением криогенных и посткриогенных ландшафтов и множеством термокарстовых озер, сочетающихся с ледниковыми водоемами, тесно переплетенными между собой небольшими водотоками. Реки отличаются спокойным течением, широкими долинами и обширными поймами. Их русла часто сильно меандрируют, как результат — долины изобилуют водоемами гидрогенного происхождения. Большинство озер характеризуются малыми площадями и незначительными глубинами. В пределах региона выделяются два самостоятельных подрайона:

1. Морские аккумулятивные слаборасчлененные равнины Баренцева моря, Малоземельская тундра.

2. Равнины ледниково-морской аккумуляции, Большеземельская тундра.

Ведущее в регионе с конца XX в. интенсивное развитие нефтяных и газовых промыслов обусловило резкое увеличение антропогенной нагрузки на его экосистемы, в том числе водные. При этом по степени лимнологической и гидрологической изученности рассматриваемый регион резко уступает ранее описанным. Первые всесторонние работы на его водоемах были проведены в 1960-е гг., после чего эпизодические осуществлялись на протяжении XX и XXI вв. [8–11 и др.]. Это позволило получить информацию не только о природном состоянии водоемов данного региона, но и об изменениях, происходивших в них по мере развития нефте- и газопромыслов. Однако эпизодичность этих исследований не отвечает современным экологическим вызовам в данном активно осваиваемом регионе. На рис. 2 показана схема



Рис. 2. Схема планируемых минерально-сырьевых центров НАО

Fig. 2. Scheme of the planned mineral resource centers of the Nenets Autonomous region

планируемых минерально-сырьевых центров Ненецкого автономного округа (НАО). Представляется, что организация постоянных наблюдений за состоянием водных объектов будет способствовать снятию имеющей место напряженности в отношениях с местными жителями [3], образ жизни которых предполагает озерное и речное рыболовство и использование неочищенной воды в питьевых целях.

На границе между европейской и азиатской частями страны находится четвертый регион, включающий северную часть Уральско-Новоземельской горной страны. Реки имеют большое падение, часто порожи́сты, нередко с каньонообразными долинами. Водоемы преимущественно небольшого размера, тектонического, ледникового и термокарстового происхождения, в речных долинах — водно-эрозионного и водно-аккумулятивного типа. Наиболее крупные по площади озера расположены на островах Новой Земли. Административно материковая часть региона относится к территориям Республики Коми и Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО), островная — к Архангельской области.

В пределах региона выделяются три крупных подрайона:

1. Возвышенная часть Полярного Урала с преобладанием горно-ледниковых, нивальных и мерзлотных форм рельефа.
2. Предуралье с преобладанием экзарационно-нивальных и аккумулятивных форм горных оледенений.
3. Острова Новой Земли с преобладанием горно-ледниковых, нивальных и мерзлотных форм рельефа и обширным распространением ледников.

Изучение водоемов северной части Урала было начато со второй половины XX в. [12], когда они оставались практически не затронутыми антропогенной деятельностью. В последние десятилетия были предприняты комплексные исследования, направленные на современную оценку водоемов и долгосрочный прогноз [13 и др.]. Они свидетельствовали, что экологическое состояние водоемов Полярного Урала продолжает сохраняться на относительно высоком уровне, основное загрязнение связано с аэрогенным переносом с сопредельных территорий. Существующие планы по промышленному освоению региона [1] требуют перевода исследований на стационарную основу. Наряду с озерами и малыми реками Урала, необходимо продумать и возможность проведения исследований на водоемах островов Новой Земли. Согласно Стратегии развития Арктической зоны на Южном острове запланировано развитие свинцово-цинкового минерально-сырьевого центра на базе Павловского месторождения, которое, в силу высокой токсичности данного производства, может существенно отразиться на экологическом состоянии водоемов.

На азиатскую часть России приходится около 80 % от площади АЗ РФ. В ее пределах представляется необходимым выделить 5 основных ландшафтно-гидрологических регионов.

Пятый регион включает равнинные районы на севере Западной Сибири. Весь регион покрыт густой сетью озер и соединяющих их водотоков. Большинство рек относится к равнинному типу, с медленным течением, широкими поймами, избытком проток, стариц и русловых озер. Вдоль береговой линии встречаются прибрежно-лагунные водоемы, заполненные солеными водами. На прибрежных равнинах высока доля термокарстовых озер, которые, по мере удаления от побережья, сочетаются с ледниковыми и просадочными водоемами [7]. Административно весь регион расположен на территории ЯНАО.

В силу равнинности территории, а также значительной схожести процессов лимногенеза на большей части региона, в его пределах выделяются два основных самостоятельных подрайона:

1. Морские аккумулятивные равнины с широко развитыми реликтовыми формами морской, ледниковой, ледниково-морской аккумуляции, занимающие большую часть Ямальского, Тазовского и Гыданского полуостровов.

2. Моренные и водно-ледниковые слабо-эродированные равнины, расположенные в материковой части региона, с хорошо выраженными моренными грядами и холмами, озами, камами, котловинами в краевых частях ледниковой равнины, прилегающих к Уралу и Средне-Сибирскому плоскогорью.

Интерес к экологическому состоянию водных экосистем региона проявился в конце XX в. и был связан с ухудшением качества поверхностных вод Сибири, вызванным освоением ее нефтегазовых ресурсов. В 2011 г. департаментом по науке и инновациям ЯНАО был создан «Научный центр изучения Арктики», одной из задач



Рис. 3. Схема планируемых минерально-сырьевых центров ЯНАО

Fig. 3. Scheme of the planned mineral resource centers of the Yamalo-Nenets Autonomous region

которого является мониторинг естественных и трансформированных природных сообществ и изучение процессов их адаптации к изменениям климата, включая оценку устойчивости водных экосистем к кислотным выпадениям [14 и др.]. Значительный научный интерес вызвали и вопросы изменений площадей термокарстовых озер [15–17]. Однако, несмотря на все усилия последних десятилетий, степень гидрологической и лимнологической изученности рассматриваемого региона не соответствует как масштабу его современного хозяйственного освоения, так и грандиозным планам его развития в ближайшей перспективе (рис. 3).

Уже сегодня в пределах региона отмечается масштабное химическое загрязнение поверхностных вод, закисление водоемов, характеризующихся здесь низкой кислотно-нейтрализующей способностью, изменение их гидрологического и гидрохимического режимов, сокращение видового разнообразия и упрощение структуры различных групп гидробионтов [14, 18 и др.]. Активное хозяйственное освоение ЯНАО может вызвать резкое усиление экологических проблем и привести к количественным изменениям озерного фонда. При отсутствии постоянного мониторинга водных объектов загрязнение водоемов и водотоков, расположенных вблизи промышленных центров, может произойти очень быстро, необходимо также учитывать и аэротехногенное загрязнение территории, приводящее к закислению водных объектов, расположенных на значительном расстоянии от промышленных центров [4]. Как результат, масштаб загрязнения водных объектов ЯНАО за несколько десятилетий может достичь масштаба загрязнения соседнего с ним Ханты-Мансийского автономного округа и, в силу повышенной уязвимости к загрязнению арктических экосистем, превзойти его. Все вышесказанное требует не просто организации системы наблюдений на водоемах и водотоках, но и тщательного обдумывания сети стационаров, которая позволяла бы адекватно отражать процессы, происходящие в различных частях региона.

Шестой регион включает север Средней Сибири, как ее низменную часть, наиболее затронутую хозяйственной деятельностью, так и низкогорные массивы гор Бырранга, плато Путорана, а также острова Северной Земли. Экологические проблемы на водоемах и водотоках Бырранга и Путорана могут возникать вследствие аэрогенного переноса с равнинной части данного региона, что требует рассмотрения горных массивов совместно с равнинными территориями. Административно к региону относится большинство входящих в АЗ РФ территорий севера Красноярского края. Для региона характерна густая речная сеть, распределение и густота которой значительно изменяются в зависимости от рельефа и геологического строения местности. В горных районах, прежде всего на Путорана, реки имеют бурное течение, тогда как по низменностям текут спокойно, а их русла значительно меандрируют. Основная масса озер относится к термокарстовому типу, также встречаются ледниковые (преимущественно остаточные), пойменные и просадочные водоемы, вдоль побережья — озера прибрежно-лагунного типа [7]. Есть и водоемы, занимающие тектонические котловины, хорошо представленные в горах.

В силу разнообразия ландшафтной структуры в пределах региона необходимо выделить пять самостоятельных подрайонов:

1. Морские аккумулятивные слаборасчлененные равнины восточной части побережья Карского моря.
2. Ледниково-морские и зандровые равнины Северо-Сибирской низменности.
3. Денудационно-эрозионные возвышенные равнины Таймырского полуострова.
4. Низкогорные массивы гор Бырранга и островов Северной Земли.
5. Горы Путорана.

Лимнологическая и гидрологическая изученность северной части Восточной Сибири существенно ниже, чем расположенной по соседству Западной Сибири. Основное загрязнение в пределах рассматриваемого региона связано с Норильским горнодобывающим и металлопроизводящим комбинатом («ГМК Норильский никель»). Наряду с промышленными сбросами непосредственно в водные объекты, работа ГМК приводит к колоссальному аэрогенному загрязнению, связанному с выбросами диоксида серы ($\approx 97\%$ всех выбросов Заполярного филиала «Норильского никеля») и тяжелых металлов, вызывающему закисление водоемов и другие негативные изменения среды на огромных пространствах Таймыра [19]. Серная кислота в атмосферных осадках опасна не только как компонент воздуха, оказы-



Рис. 4. Схема планируемых минерально-сырьевых центров на севере Красноярского края

Fig. 4. Scheme of planned mineral resource centers in the north of the Krasnoyarsk region

вающий отрицательное воздействие на биоту, но и как растворитель минеральных и органических соединений металлов в аэрозолях и в почвах, способствующий высвобождению и миграции металлов [20].

Несмотря на наблюдающуюся в настоящее время локальность очагов загрязнения, производимый ими эффект требует организации системы наблюдений на целом ряде озер и водотоков севера Средней Сибири, расположенных в различных ландшафтах и на разном удалении от Норильска. Тем более что, согласно стратегии развития АЗ РФ, наряду с дальнейшим развитием Норильского промышленного района планируется создание еще целого ряда производств в пределах Таймырского полуострова (рис. 4).

Седьмой регион расположен на севере Северо-Восточной Сибири и простирается от нижнего течения Лены до восточных границ континента. Реки типично равнинные, протекающие по обширным заболоченным низменностям. В их долинах расположено большое количество озер гидрогенного и эрозионно-термокарстового типов. Вдоль побережья встречаются лагунные водоемы и близкие к ним морские реликтовые озера. С продвижением в глубь материка абсолютное преобладание получают термокарстовые водоемы. Административно регион включает часть территории Республики Саха и арктическое побережье Чукотского автономного округа.

Восьмой регион охватывает равнины и плоскогорья зоны повсеместного распространения многолетней мерзлоты, расположенные в пределах Среднесибирского плоскогорья, и протягивается от долины р. Енисей на западе до долины р. Лены на востоке. Регион расчленен густой сетью речных долин, в его возвышенной части реки имеют горно-равнинный характер, с падением высоты — приобретают черты типичных равнинных рек. Восьмой регион характеризуется относительно невысокой озерностью. Наличие мерзлоты и ее значительная мощность создают условия для образования и развития озер термокарстового происхождения, чередующихся близ речной сети с пойменно-долинными и эрозионно-термокарстовыми водоемами. Административно регион включает территорию Республики Саха и небольшую часть Красноярского края.

Девятый регион включает горные области Северо-Восточной Сибири, простирающиеся почти до Тихоокеанского побережья, где горы сменяются прибрежными равнинами, включая самую крупную — Анадырскую. Реки имеют горный, отчасти горно-равнинный характер. Озера гидрогенного, ледникового, тектонического и ледниково-тектонического происхождения, реликтовые, термокарстовые, завально-запрудные и кратерные. Административно регион включает большую часть Чукотского автономного округа и часть горных районов Республики Саха.

Гидрологическая и лимнологическая изученность всех трех регионов низкая, что в значительной степени оправдывается пока малой степенью их хозяйственной освоенности, связанной с удаленностью и неблагоприятными условиями проживания. Как результат, загрязненность водоемов и водотоков носит локальный характер. Планируемое развитие регионов требует создания здесь лишь небольшой сети стационарных наблюдений на озерах и малых реках, привязанной к основным районам освоения. В силу того, что климат данной части АЗ РФ крайне суровый, расположенные в ее пределах водные объекты отличаются очень низкой степенью устойчивости к любым загрязнениям, так что даже при относительно небольшом воздействии происходит быстрая перестройка их экосистем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представляется, что планируемая сеть наблюдений за озерами и малыми реками АЗ РФ должна строиться для каждого региона с учетом мозаичности его ландшафтного деления (основываясь на выделенные подрайоны), а также степени антропогенной нагрузки. В связи с последним расширенная сеть наблюдений требуется прежде всего на западе и в центральной части АЗ РФ. На северо-востоке Сибири современный и планируемый уровень антропогенной активности пока позволяет иметь разреженную сеть, привязанную к основным хозяйственным центрам, фактически без учета мозаичности ландшафтного деления.

Необходимо отметить, что наряду с общими наблюдениями, которые необходимо проводить на всех пунктах, что позволит получить данные об особенностях гидрологических и внутриозерных процессов в различных частях Арктической зоны и сравнивать их течение, необходима разработка и специальных наблюдений. Последние, разрабатываемые в рамках каждого выделенного региона, должны отвечать требованиям выявления особенностей региональных процессов и информационного обеспечения математического моделирования прогноза аварийных ситуаций и экологического кризиса, вызванных основными видами антропогенной деятельности в пределах конкретного региона. Соответственно, они должны учитывать вид добываемых природных ресурсов, степень их токсичности, характер распространения в окружающей среде загрязнения, возникающего при их добыче и переработке, особенности протекания биогеохимических циклов различных химических элементов. Очевидно, что характер распространения загрязнения при добыче углеводородных ресурсов резко отличается от характера распространения загрязнения, связанного с добычей твердых горючих ископаемых, и в еще большей степени — добычей и переработкой металлических или неметаллических ископаемых. В этой связи набор специальных наблюдений, проводимых на северо-западе АЗ РФ и на прибрежных равнинах ее центральной части (Ненецкий и Ямало-Ненецкий автономные округа), будут отличаться. В то же время на севере Центральной Сибири имеет смысл разумно сочетать и те, и другие наблюдения.

Предлагается на начальном этапе отработать принципы организации сети наблюдений за экологическим состоянием водных объектов на примере нескольких выделенных регионов, характеризующихся наиболее высоким антропогенным прессом, отличающихся наиболее развитыми коммуникационными связями и к настоящему времени являющихся наиболее гидрологически и лимнологически изученными. Такими регионами представляются прежде всего первый (Кольский полуостров с частью материка, к которой он примыкает) и пятый (север Западной Сибири), принципиально различающиеся между собой по характеру антропогенного воздействия. Для указанных регионов выбор реперных водных объектов представляется наименее сложным, поэтому на их примере предлагается отработать принципы размещения пунктов наблюдений, разработать программу наблюдений с учетом особенностей антропогенного воздействия в пределах каждого региона, решить вопросы сбора и передачи получаемой информации.

Конфликт интересов. Конфликт интересов отсутствует.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания по теме АААА-А19-119091990011-1 «Закономерности распределения озер по территории Евразии и оценка их водных ресурсов» и АААА-А20-120112690064-2 «Разработка методов оценки и прогнозирования состояния водных объектов по

количественным характеристикам, подготовка новых видов гидрологической информационной продукции».

Competing interests. The authors have no competing interests.

Funding. The work was carried out within the framework of the state task on the topic AAAA-A19-119091990011-1 “Patterns of the lakes distribution across the territory of Eurasia and assessment of their water resources” and AAAA-A20-120112690064-2 “Development of methods for assessing and predicting the state of water bodies by quantitative characteristics, preparation of new types of hydrological information products”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года. Утверждена Указом Президента Российской Федерации от 26.10.2020. № 645. 35 с.
2. Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество. Ежегодное издание. 2016 год. М.: ООО «РПЦ Офорт», 2017. 164 с.
3. Румянцев В.А., Измайлова А.В., Крюков Л.Н. Состояние водных ресурсов озер Арктической зоны Российской Федерации // Проблемы Арктики и Антарктики. 2018. Т. 64. № 1. С. 84–100. doi: 10.30758/0555-2648-2018-64-1-84-100.
4. Румянцев В.А., Измайлова А.В., Макаров А.С. Состояние озерного фонда Арктической зоны Российской Федерации // Вестник Российской академии наук. 2021. Т. 91. № 2. С. 13–24. doi: 10.30758/0555-2648-2018-64-1-84-100.
5. Постановление Правительства РФ от 10 апреля 2007 г. № 219 «Об утверждении Положения об осуществлении государственного мониторинга водных объектов». С изменениями и дополнениями от: 22 апреля, 17 октября 2009 г., 13 июля, 14 ноября 2011 г., 5 июня 2013 г., 18 апреля 2014 г. URL: <http://base.garant.ru/2162365/> (дата обращения 05.05.2020).
6. Румянцев В.А., Драбкова В.Г., Измайлова А.В. Озера европейской части России. СПб.: Лема, 2015. 392 с.
7. Румянцев В.А., Драбкова В.Г., Измайлова А.В. Озера азиатской части России. СПб.: Лема, 2017. 480 с.
8. Гидробиологическое изучение и рыбохозяйственное освоение озер Крайнего Севера СССР. М.: Наука, 1966. 168 с.
9. Голдина Л.П. География озер Большеземельской тундры. Л.: Наука, 1972. 101 с.
10. Особенности структуры экосистем озер Крайнего Севера: (На примере озер Большеземельской тундры) / Отв. ред. В.Г. Драбкова, И.С. Трифонова. СПб.: Наука, 1994. 259 с.
11. Продуктивность озер Восточной части Большеземельской тундры / Отв. ред. Г.Г. Винберг, Т.А. Власова. Л.: Наука, 1976. 146 с.
12. Кеммерих А.О. Гидрография Северного, Приполярного и Полярного Урала. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 139 с.
13. Биоразнообразие экосистем Полярного Урала. Сыктывкар: ОАО «Коми республиканская типография», 2007. 251 с.
14. Агбалян Е.В., Хорошавин В.Ю., Шинкаур Е.В. Оценка устойчивости озерных экосистем Ямало-Ненецкого автономного округа к кислотным выпадениям // Вестник Тюменского гос. ун-та. Экология и природопользование. 2015. Т. 1. № 1 (1). С. 45–54.
15. Брыскина Н.А., Полищук В.Ю., Полищук Ю.М. База данных по термокарстовым озерам Западной Сибири на основе космических снимков и возможности ее использования // Соврем. пробл. дистанцион. зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 3. С. 175–180.

16. Днепровская В.П., Полищук Ю.М. Геоинформационный анализ геокриологических изменений в зоне многолетней мерзлоты Западной Сибири с использованием космических снимков // Геоинформатика. 2008. № 2. С. 9–14.
17. Кирпотин С.Н., Полищук Ю.М., Брыксина Н.А. Динамика площадей термокарстовых озер в сплошной и прерывистой криолитозонах Западной Сибири в условиях глобального потепления // Вестн. Том. ун-та. 2008. № 311. С. 185–189.
18. Якубсон К.И., Корниенко С.Г., Разумов С.О. и др. Геоиндикаторы изменения окружающей среды в районах интенсивного освоения нефтегазовых месторождений и методы их оценки // Георесурсы. Геоэнергетика. Геополитика: Электр. научный журнал. 2012. Вып. 2. № 6. URL: <http://www.oilgasjournal.ru> (дата обращения 15.12.2019).
19. Базова М.М., Кошевой Д.В. Оценка современного состояния качества вод Норильского промышленного района // Арктика: экология и экономика. 2017. № 3 (27). С. 49–60. doi: 10.25283/2223-4594-2017-3-49-60.
20. Гурский Ю.Н. Анализ экологических проблем Российского Севера на примере комплексного геолого-геохимического изучения Норило-Пясинской водной системы // Развитие минерально-сырьевой базы Сибири: от Обручева В.А., Усова М.А., Урванцева Н.Н. до наших дней: Мат-лы Всерос. форума с межд. участ. Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2013. С. 479–482.

REFERENCES

1. *Strategiya razvitiya Arkticheskoy zony Rossijskoj Federacii i obespecheniya nacional'noj bezopasnosti na period do 2035 goda*. Strategy for the development of the Arctic zone of the Russian Federation and ensuring national security for the period up to 2035. Approved by Decree of the President of the Russian Federation No. 645. 26.10.2020. № 645. 35 p. [In Russian].
2. *Resursy poverkhnostnyh i podzemnyh vod, ih ispol'zovanie i kachestvo. 2016 god*. Resources of surface and ground waters, their use and quality. Annual Edition. 2016. Moscow: ООО «RPC Ofort», 2017: 164 p. [In Russian].
3. Rumyantsev V.A., Izmajlova A.V., Kryukov L.N. The state of water resources of the lakes of the Arctic zone of the Russian Federation. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2018, 64 (1): 84–100. [In Russian].
4. Rumyantsev V.A., Izmajlova A.V., Makarov A.S. State of the lake fund of the Arctic zone of the Russian Federation. *Vestnik Rossijskoj akademii nauk*. Bulletin of the Russian Academy of Sciences. 2021, 91 (2): 13–24. [In Russian].
5. *Postanovlenie Pravitel'stva RF 10.04.2007 N 219 "Ob utverzhdenii Polozheniya ob osushchestvlenii gosudarstvennogo monitoringa vodnyh ob'ektov" s izmeneniyami i dopolneniyami ot 17.10.2009, 13.07, 14.11 2011., 5.06.2013, 18.04. 2014*. Decree of the Government of the Russian Federation of April 10, 2007 N 219. Available at: <http://base.garant.ru/2162365/> (accessed 05.05.2020). [In Russian].
6. Rumyantsev V.A., Drabkova V.G., Izmajlova A.V. *Ozera evropejskoj chasti Rossii*. Lakes of the European part of Russia. St. Petersburg: Lema, 2015: 392 p. [In Russian].
7. Rumyatscev V.A., Drabkova V.G., Izmajlova A.V. *Ozera aziatskoj chasti Rossii*. Lakes of the Asian part of Russia. St. Petersburg: Lema, 2017: 480 p. [In Russian].
8. *Gidrobiologicheskoe izuchenie i rybohozyajstvennoe osvoenie ozer Krajnego Severa SSSR*. Hydrobiological study and fishery development of lakes in the Far North of the USSR. Moscow: Nauka, 1966: 168 p. [In Russian].
9. Goldina L.P. *Geografiya ozer Bol'shezemel'skoj tundry*. Geography of lakes Bolshezemelskaya tundra. Leningrad: Nauka, 1972: 101 p. [In Russian].
10. *Osobennosti struktury ekosistem ozer Krajnego Severa. (Na primere ozer Bol'shezemel'skoj tundry)*. Features of the structure of ecosystems of the lakes of the Far North. (On the example of the

lakes of the Bolshezemelskaya tundra). Ed. V.G. Drabkova, I.S. Trifonova. St. Petersburg: Nauka, 1994: 259 p. [In Russian].

11. *Produktivnost' ozyor Vostochnoj chasti Bol'shezemel'skoj tundry*. Productivity of lakes in the Eastern part of the Bolshezemelskaya tundra. Ed. G.G. Vinberg, T.A. Vlasova. Leningrad: Nauka, 1976: 146 p. [In Russian].

12. *Kemmerih A.O. Gidrografiya Severnogo, Pripolyarnogo i Polyarnogo Urala*. Hydrography of the Northern, Subpolar and Polar Urals. Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1961: 139 p. [In Russian].

13. *Bioraznoolobrazie ekosistem Polyarnogo Urala*. Biodiversity of ecosystems of the Polar Urals. Syktyvkar: OAO « Komi republican printing house », 2007: 251 p. [In Russian].

14. *Agbalyan E.V., Horoshavin V.Yu., SHinkaur E.V.* Assessment of the resistance of lake ecosystems in the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug to acid deposition. *Vestnik Tyumenskogo gos. un-ta. Ekologiya i prirodopol'zovanie*. Bull. Of Tyumen University. 2015, 1 (1): 45–54. [In Russian].

15. *Bryskina N.A., Polishchuk V.Yu., Polishchuk Yu.M.* Database on thermokarst lakes in Western Siberia based on satellite images and the possibility of its use. *Sovremennye problemy dinacionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. Current problems in remote sensing of the Earth from space. 2011, 8 (3): 175–180. [In Russian].

16. *Dneprovskaya V.P., Polishchuk Yu.M.* Geoinformation analysis of geocryological changes in the permafrost zone of Western Siberia using space images. *Geoinformatika*. Geoinformatics. 2008, 2: 9–14. [In Russian].

17. *Kirpotin S.N., Polishchuk Yu.M., Bryskina N.A.* Dynamics of areas of thermokarst lakes in continuous and discontinuous permafrost zones of Western Siberia under the conditions of global warming. *Vestnik Tomskogo universiteta*. Bulletin of Tomsk University. 2008, 311: 185–189. [In Russian].

18. *Yakubson K.I., Kornienko S.G., Razumov S.O.* Geoindicators of environmental change in areas of intensive development of oil and gas fields and methods for their assessment. *Georesursy. Geoenergetika. Geopolitika*. Elektronnyj nauchnyj zhurnal. Georesources. Geoenergetics. Geopolitics. Electronic journal. 2012, 2 (6): 20. Available at: <http://www.oilgasjournal.ru> (accessed 15.12.2019). [In Russian].

19. *Bazova M.M., Koshevoj D.V.* Assessment of the current state of water quality in the Norilsk industrial region. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. Arctica: ecology and economics. 2017, 3 (27): 49–60. [In Russian].

20. *Gurskij Yu.N.* Analysis of the environmental problems of the Russian North on the example of a comprehensive geological and geochemical study of the Norilo-Pyasinsky water system. *Razvitie mineral'no-syr'evoy bazy Sibiri: ot Obrucheva V.A., Usova M.A., Urvanceva N.N. do nashih dnei: materialy Vseros. forum s mezhd. uchastiem*. All Russian conference “Development of the mineral resource base of Siberia from Obruchev V. to the present day”. Tomsk: National Research Tomsk Polytechnic University, 2013: 479–482. [In Russian].

ЭКОЛОГИЯ, БИОЦЕНОЛОГИЯ И БИОГЕОГРАФИЯ ECOLOGY, BIOCENOLOGY AND BIOGEOGRAPHY

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-2-191-207>
УДК 593.16



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

Ледовые водоросли в условиях современного состояния водно-ледовой среды Арктического бассейна

И.А. Мельников^{1}, Л.С. Житина², В.В. Иванов^{2,3}, А.Б. Тимофеева³*

¹ — Институт океанологии им. П.П. Шишова РАН, Москва, Россия

² — Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Москва, Россия

³ — ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,
Санкт-Петербург, Россия

**migor39@yandex.ru*

Резюме

В современном Северном Ледовитом океане (СЛО) наблюдаются заметные изменения в составе и структуре биологических сообществ, населяющих водно-ледовую среду. За последние два десятилетия в центральных районах СЛО отмечено снижение численности видового состава ледовой флоры и фауны на фоне изменяющейся физической среды их обитания. В условиях современной климатической нестабильности в СЛО важно отслеживать и оценивать их состав, структуру и динамику развития. Важно также сохранять методы обработки собранных материалов для сравнения состояния водно-ледовой биоты в сходных пространственно-временных масштабах бассейна. В настоящем исследовании в качестве индикаторов изменений выбраны центрические и пеннатные диатомовые водоросли, доминирующие в ледовых флористических сообществах. Целью настоящей работы является анализ физического состояния водно-ледовой среды и видового состава ледовых диатомовых водорослей по материалам экспедиций в рамках программы NAVOS на НЭС «Академик Трёшников» в Арктическом бассейне в 2018 и 2021 гг. В задачу полевых работ входили наблюдения за состоянием ледяного покрова в районе проведения экспедиций, отбор ледяных кернов на предмет оценки солевого состава и видового состава водорослей, а также STD-зондирование подледного водного слоя. Анализ собранных материалов показал значительные различия в видовом составе и обилии водорослей между сезонами, что свидетельствует о формировании независимых друг от друга флористических сообществ в современных условиях нестабильной физической среды в центральных районах СЛО, что подтверждает ранее полученные результаты в период 2007–2015 гг. Обсуждаемые материалы получены в короткий период времени и на ограниченных пространствах в зонах продуцирования однолетних льдов на акваториях шельфовых морей и зонах выноса в центральные районы СЛО. Вместе с тем краткосрочные наблюдения дают «мгновенную» информацию о качественном и количественном состоянии ледовых биологических сообществ. Для получения достоверной оценки необходимы длительные наблюдения, которые, возможно, будут организованы в ближайшее время на новых логистических подходах в изучении морской Арктики.

Ключевые слова: Арктический бассейн, водно-ледовая среда, ледовые водоросли, состав, обилие, сходство, разнообразие.

Для цитирования: Мельников И.А., Житина Л.С., Иванов В.В., Тимофеева А.Б. Ледовые водоросли в условиях современного состояния водно-ледовой среды Арктического бассейна // Проблемы Арктики и Антарктики. 2022. Т. 68. № 2. С. 191–207. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-2-191-207>.

Поступила 22.04.2022

После переработки 20.05.2022

Принята 06.06.2022

Ice algae in current water-ice environmental condition of the Arctic Ocean

Igor A. Melnikov^{1*}, Ludmila S. Zhitina², Vladimir V. Ivanov^{2,3},
Anna B. Timofeeva³

¹ — Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² — Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

³ — State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

*migor39@yandex.ru

Summary

In the Arctic Ocean (AO) of today, there are noticeable changes in the composition and structure of biological communities inhabiting the water-ice environment. Over the past two decades, a decrease in the number of species of the sea ice flora and fauna has been noted in the central regions of the AO due to the changing physical environment of their habitat. In view of the current climatic instability in the AO, it is important to monitor and evaluate their composition, structure and dynamics of development. It is also important to preserve the methods of processing the materials collected in order to compare the state of the water-ice biota on similar spatial and temporal scales of the basin. In the present study, centric and pennate diatoms dominating in ice floristic communities were selected as indicators of changes. The aim of the work is to analyze the physical state of the water-ice environment and the species composition of ice diatoms based on the materials of the expeditions within the NABOS program at the Research Vessel (R/V) “Akademik Treshnikov” in the Arctic Basin in 2018 and 2021. The field work included observations of the state of the sea-ice cover in the area of the expeditions, the selection of ice cores to assess the salt composition and species composition of the algae, as well as CTD-sounding of the under ice — water layer. The analysis of the materials collected showed significant differences in the species composition and abundance of algae between the seasons, which indicates the formation of independent floristic communities in the current conditions of unstable physical environment in the central regions of the AO, which confirms the previously obtained results in the period 2007–2015. The materials under discussion were obtained in a short period of time and in limited spaces in the zones of production of annual ice in the waters of the shelf seas and zones of removal to the central regions of the AO. At the same time, short-term observations provide “instant” information about the qualitative and quantitative state of sea-ice biological communities. In order to obtain reliable estimates, long-term observations are needed, which may be organized in the near future based on new logistical approaches to the study of the marine Arctic.

Keywords: Central Arctic Ocean, environmental conditions, ice algae, species composition, abundance, similarity, diversity.

For Citation: Melnikov I.A., Zhitina L.S., Ivanov V.V., Timofeeva A.B. Ice algae in current water-ice environmental condition of the Arctic Ocean. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2022, 68 (2): 191–207. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-2-191-207>.

Received 22.04.2022

Revised 20.05.2022

Accepted 06.06.2022

ВВЕДЕНИЕ

В современном Северном Ледовитом океане (СЛО) наблюдаются сокращение площади ледяного покрова [1, 2, 3], изменения в возрастном составе, связанные со

сменой доминирования многолетних льдов доминированием однолетних льдов [4, 5, 6], значительное уменьшение толщины льда [7, 8, 9, 10, 11]. Как следствие изменений в морском ледяном покрове, в СЛО отмечено изменение в составе и структуре биологических сообществ, населяющих водно-ледовую среду. Среди важных биологических индикаторов изменений рассматриваются ледовые диатомовые водоросли, доминирующие по численности и биомассе в составе флористических сообществ ледяного покрова центральных районов СЛО. Современные знания о таксономическом составе ледовых водорослей в Арктическом бассейне (АБ) в период доминирования многолетних льдов основаны, главным образом, на материалах, полученных в период работ на дрейфующих станциях «Северный полюс-22, 23, 24» в 1975–1982 гг. [12]. Сравнительный анализ данных видового состава ледовых диатомовых водорослей за период 1980–2010 гг. показал, что многолетний лед содержал на 39 % больше видов диатомовых водорослей, чем однолетние льды [13, 14, 15]. Анализ также показал, что до 75 % видов диатомовых водорослей включаются в лед в момент формирования ледовой матрицы, а остальные 25 % включаются в лед из воды во время его дрейфа в Трансарктической зоне выноса из районов формирования в направлении к проливу Фрама. Многолетний мониторинг видового состава ледовой биоты в центральных районах СЛО, начиная с МПГ в 2007 г. по настоящее время, показал, что в условиях обновляемой физической среды ежегодно формируются независимые друг от друга биологические сообщества [13, 14, 16, 17, 18]. В условиях современной климатической нестабильности в СЛО важно отслеживать и оценивать их состав и динамику развития, а ледовые диатомовые водоросли являются важным индикатором наблюдаемых изменений. Целью настоящей работы является анализ состояния водно-ледовой среды и видового состава ледовых водорослей по материалам экспедиций в рамках программы NABOS на НЭС «Академик Трёшников» в Арктическом бассейне в 2018 и 2021 гг. При обсуждении полученных результатов привлекаются также материалы предыдущих исследований авторов в центральных районах СЛО в период 2007–2011, 2015 и 2018 гг. [15, 20, 21, 22].

Анализ результатов проводится здесь без обсуждения причин изменений под влиянием природного или антропогенного факторов. Морские ледовые термины даются в соответствии с номенклатурой ВМО “Sea ice Nomenclature” [23], а термины и номенклатура по ледовой биоте в соответствии с рекомендацией рабочей группы SCOR “Sea Ice Ecology” [24].

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Район исследований охватывал акваторию в широтном направлении между 78° и 81° с. ш., а меридиональном, соответственно, между 137° в. д. и 173° з. д. (рис. 1) Полевые работы в 2018 г. выполнены на трех полигонах 11, 14 и 15 сентября, а в 2021 г. — 01, 02 и 10 октября. Организация и проведение полевых работ в обеих экспедициях сохранялись, что дает основу для сравнения состояний водно-ледовой биоты в сходных пространственно-временных масштабах бассейна. В дальнейшем изложении для краткости районы работ в экспедициях НЭС «Академик Трёшников» в 2018 и 2021 гг. будут обозначаться как районы А-18 и В-21, а точки проведения полевых работ на полигонах, соответственно, А1, А2, А3 и В1, В2, В3.

Полевые работы выполнялись в момент стоянки у края ледяного поля, к которому швартовалось судно для постановки буев в рамках программы NABOS. Работы включали сбор ледяных кернов и CTD-зондирование 0–50 м водного слоя. В отборе ледяных кернов, последующей первичной и лабораторной обработке использованы методы, принятые в гидро- и криобиологической практике [25, 26, 27]. КERN отбирали с помощью кольцевого бура, делили на кратные слои, каждый ледовый сегмент помещали в отдельные пластиковые емкости и растапливали при комнатной температуре.

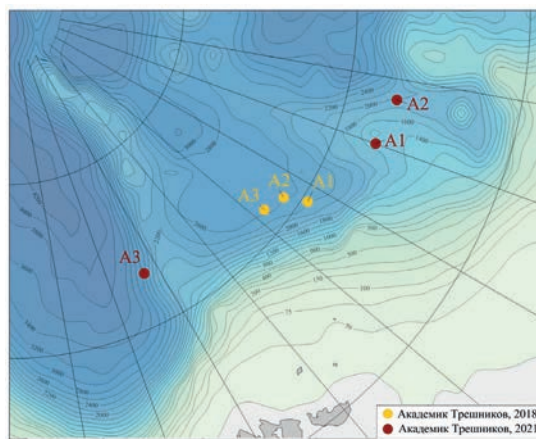


Рис. 1. Положение районов А-18 (желтые точки) и В-21 (красные точки)

Fig. 1. Location of areas A-18 (yellow dots) and B-21 (red dots).

Таблица 1

Даты, географические координаты и толщина ледяных кернов,
отобранных в районах А-18 и В-21

Table 1

Dates, geographical coordinates and ice cores thickness obtained in areas A-18 and B-21

A-18				
Керн №	Дата	Широта	Долгота	Толщина, см
A1	11.09.2018	79° 49' с. ш.	167° 21' в. д.	142
A2	14.09.2018	80° 28' с. ш.	165° 45' в. д.	183
A3	15.09.2018	80° 42' с. ш.	162° 01' в. д.	250

B-21				
Керн №	Дата	Широта	Долгота	Толщина, см
B1	01.10.2021	78° 48' с. ш.	180° 03' з. д.	43
B2	02.10.2021	78° 34' с. ш.	173° 00' з. д.	59
B3	10.10.2021	81° 31' с. ш.	137° 10' в. д.	77

Таблица 2

Даты и географические координаты станций CTD в районах А-18 и В-21

Table 2

Dates and geographical coordinates of CTD stations in areas A-18 and B-21

A-18			
Станция	Дата	Широта	Долгота
A1	10.09.2018	79° 24' с. ш.	168° 84' з. д.
A2	13.09.2018	80° 50' с. ш.	167° 15' в. д.
A3	15.09.2018	80° 39' с. ш.	161° 57' в. д.

B-21			
Станция	Дата	Широта	Долгота
B1	01.10.2021	78° 80' с. ш.	180° 11' з. д.
B2	27.09.2021	78° 59' с. ш.	173° 48' з. д.
B3	09.10.2021	81° 49' с. ш.	137° 42' в. д.

Часть талой воды использовали для измерения солености, а остальной объем — для выделения взвеси на видовой состав ледовых водорослей [28]. Фиксированные пробы хранились на борту судна до времени таксономического анализа в стационарных условиях лабораторий МГУ. Сходство видового состава флористических сообществ оценивали по индексу Серенсена–Чекановского [29]. Вертикальное CTD-зондирования в слое 0–50 м выполняли судовым комплексом SBE в момент стоянки у края ледяного поля с борта судна. Пространственно-временные характеристики точек отбора ледяных кернов и станций CTD представлены в таблицах 1 и 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Ледяной покров. В современном СЛО изменчивость площади ледяного покрова по-прежнему остается высокой: минимум площади льда в СЛО в сентябре 2018 г. составил 4,57 млн км², а в сентябре 2021 г. — 4,81 млн км² [30, 31, 32]. В рамках программы экспедиции NABOS в 2018 и 2021 гг. по методике, разработанной в ААНИИ [33], выполнялись специализированные ледовые наблюдения за распределением характеристик ледяного покрова, в том числе за толщиной льда по выворотам вдоль борта судна. В дополнение к визуальным наблюдениям для получения достоверного массива данных производились измерения толщины льда с помощью цифрового телевизионного комплекса [34].

Ледовые условия во время экспедиции в 2018 г. были легкими, большая часть пути НЭС «Академик Трёшников» проходила по чистой воде. Только самый восточный отрезок маршрута в Восточно-Сибирском море проходил в зоне сплоченного льда, где и были отобраны три керна на ледовых станциях. В районе проведения ледовых станций А-18 ледовая обстановка характеризовалась сплоченностью более 8 баллов с преобладанием однолетнего льда в форме больших, изредка гигантских ледяных полей (500 м — 2 км и >10 км соответственно). Толщина остаточного однолетнего льда в среднем составляла 70–100 см, изредка 150 см, при большой разрушенности 30–50 см. Для выполнения ледовых станций удалось подобрать обломки ледяных полей, где были отобраны керны А1, А2 и А3 толщиной 70–100 см.

Ледовые условия экспедиции в 2021 г. были сложнее [34], а ледяные керны были отобраны в двух разных районах. Керны В1 и В2 были взяты на обломках полей остаточного льда значительно восточнее, чем в 2018 г. Работы на этом участке маршрута проходили в условиях сплоченного льда, преимущественно 10 баллов с преобладанием молодого и начального, на остаточный лед приходилось в среднем 4 балла, толщиной преимущественно 50–70 см. Толщина поля В1 варьировала от 30–50 до 80 см, в торосах до 1,5 м. Толщина поля В2 изменялась от 40–50 до 120 см, преимущественно 60–70 см, в торосах свыше 1,5 м. Третья ледовая станция с отбором ледяного керна В3 была проведена значительно западнее, в секторе Арктического бассейна к северу от моря Лаптевых во льдах сплоченностью 10 баллов, где остаточного льда наблюдалось до 5–6 баллов. Толщина льда полигона В3 варьировала от 50 до 100 см, в торосах до 2 м и более.

Все отобранные керны в районах А-18 и В-21 представляли собой остаточные после летнего таяния льды, что подтверждается данными по солености, которые характерны для этой возрастной группы льдов: минимальные значения солености в верхних и максимальные значения в нижних слоях (рис. 2).

Подледный водный слой. В 0–50 м слое выявлена двухслойная структура: верхний квазиоднородный слой (15–25 м) практически однороден по солености от 28,5 ‰ в восточных районах до 31 ‰ в западном районе (рис. 3). Начиная с нижней границы однородного слоя, до 50 м наблюдается слой скачка солености: повышение солености при практической неизменности температуры. Значительно отличается от других точка

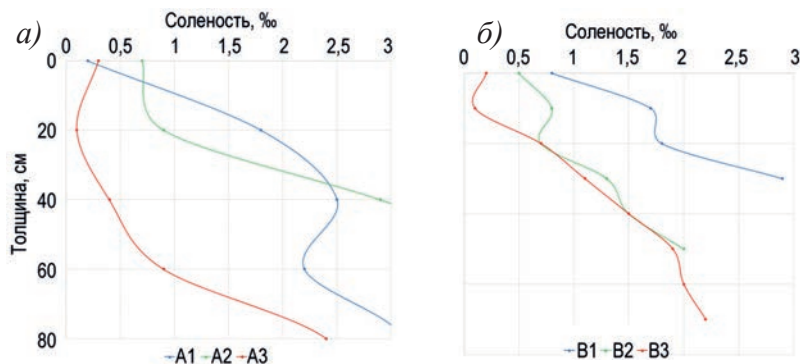


Рис. 2. Распределение солености в толще ледяных кернов в районах А-18 (а) и В-21 (б)

Fig. 2. Salinity distribution of the ice cores in areas A-18 (a) and B-21 (б)

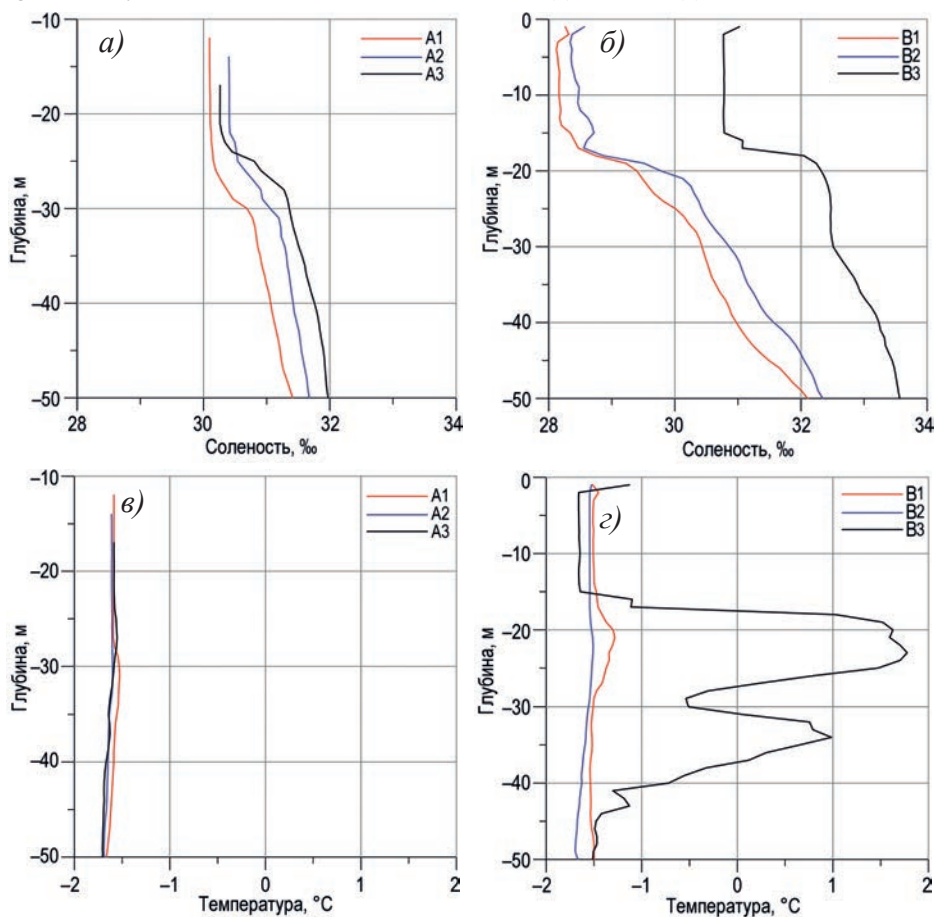


Рис. 3. Распределение солености (а, б) и температуры (в, г) в подледном 0–50 м водном слое в районах А-18 и В-21

Fig. 3. Salinity (а, б) and temperature (в, г) distribution of under the sea ice water layer 0–50 m in areas A-18 and B-21

ВЗ в районе В-21, где летом длительное время наблюдался сильно разреженный лед, а рядом с кромкой — обширные пространства открытой воды. По этой причине в этом районе летом сформировался очень теплый прогретый слой (до глубины 40 м, со средней температурой около 1,5 °С), который в момент выполнения станции активно разрушался вследствие вертикальной конвекции. В остальных районах в летний сезон постоянно присутствовал лед и летний прогрев был незначительным [35].

Таблица 3

Таксономический состав и численность клеток ледовых водорослей ($\times 10^3$ кл/л) в каждом ледяном керне в районах А-18 и В-21

Table 3

Taxonomic composition and number of ice algae cells ($\times 10^3$ cells/l) in each ice core in areas A-18 and B-21

Таксон	А-18			В-21		
	А1	А2	А3	В1	В2	В3
Bacillariophyta						
<u>Mediophyceae</u> (центрические)						
<i>Bacterosira bathyomphala</i> (Cleve) Syvertsen et Hasle			0,7			
<i>Chaetoceros constrictus</i> Gran				1,1		
<i>Chaetocerus socialis</i> Lauder			0,1	0,3		
<u>Coscinodiscophyceae</u> (центрические)						
<i>Melosira arctica</i> Dickie		0,1		0,1		
<i>Rhizosolenia setigera</i> Brightw.		0,1		0,1		0,2
<u>Bacillariophyceae</u> (пеннатные)						
<i>Amphora laevis</i> W. Greg.						0,1
<i>Cylindrotheca closterium</i> (Ehrenb.) Reimann et J.W. Lewin	0,3	0,9	11	6	0,5	6
<i>Diploneis littoralis</i> (Donkin) Cleve				0,6	0,1	11
<i>Entomoneis kjellmanii</i> (Cleve) Poulin et Cardinal	0,1	0,2	0,2	0,1		0,1
<i>Fossula arctica</i> Hasle et al.			4			
<i>Fragilariopsis cylindrus</i> (Grunow) Helmcke et Wilh. Krieg.	3	0,6	29		17	146
<i>Fragilariopsis oceanica</i> (Cleve) Hasle	1	0,4	29			
<i>Hantzschia weiprechtii</i> Grunow	0,1					
<i>Navicula directa</i> (W. Sm.) Bréb.	0,2	0,1	3	0,1	2	0,5
<i>Navicula pelagica</i> Cleve			4			5
<i>Navicula transitans</i> Cleve	0,1		6		0,1	0,1
<i>Navicula vanhoeffenii</i> Gran			2	2	0,4	4
<i>Navicula</i> sp. 1			0,1		0,1	0,1
<i>Nitzschia arctica</i> Cleve					27	0,1
<i>Nitzschia frigida</i> Grunow	79	89	78	47	49	242
<i>Nitzschia pellucida</i> Grunow	1	2	2			0,3
<i>Nitzschia</i> sp.	0,1	1	0,2	0,2	5	62
<i>Pennatae</i> sp.					0,1	5
<i>Pleurosigma clevei</i> Grunow						0,1
<i>Pseudo-nitzschia delicatissima</i> (Cleve) Heiden			1	31	0,6	
<i>Pseudo-nitzschia seriata</i> (Cleve) H. Perag.				0,3		
<i>Synedropsis hyperborea</i> (Grunow) Hasle et al.	2	4	2	3	0,5	17
<i>Thalassionema nitzschioides</i> (Grunow) Mereschk.	0,1					
<i>Trachyneis aspera</i> (Ehrenb.) Cleve						0,1
Dinophyta (= Miozoa)						
<i>Amylax triacantha</i> (Jørg.) Sournia	1	0,3	1		0,1	
<i>Gymnodinium wulffii</i> J. Schiller						0,2
<i>Prorocentrum balticum</i> (Lohman) A.R. Loebl.		0,1				
<i>Protoperidinium bipes</i> (Paulsen) Balech	0,1					
<i>Protoperidinium brevipes</i> (Paulsen) Balech						0,2
Cysts	5	3	8	3	20	79
Ochrophyta						
<i>Groenlandiella brevispina</i> Kol	4	6	11	1	1	1
Обилие общее	97	108	191	95	125	581

Ледовая флора. Идентификация видовой принадлежности водорослей в отобранных кернах проводилась послойно в верхнем, среднем и нижнем слоях. В данном исследовании не ставится цель обсуждения особенностей вертикального распределения водорослей в ледяной толще. Оценка видового состава и численности клеток ледовых водорослей проводилась в целом для каждого ледяного керна на полигонах А1, А2, А3 в районе А-18 и на полигонах В1, В2, В3 в районе В-21. Данные определений представлены в табл. 3.

ОБСУЖДЕНИЕ

Полевые работы в период экспедиций НЭС «Академик Трёшников» в 2018, 2021 гг. пришлось на время минимального развития ледяного покрова Арктического бассейна и проводились в акваториях, граничащих с сибирскими шельфовыми морями, которые П.А. Гордиенко называл морями-производителями льдов, поскольку на акватории этих морей происходит основное ледообразование, а затем вынос льдов в Трансарктический дрейф [36]. Вследствие направленности генерального дрейфа, формирующиеся здесь ледовые флористические сообщества попадают в центральные районы, где включаются в биологическую структуру экосистемы пелагиали СЛО. В соответствии с биогеографическими представлениями о структуре ареалов океанических сообществ [37], в настоящем исследовании районы А-18 и В-21 рассматриваются как основа ареалов, где формируются ледовые флористические сообщества, а Трансарктический дрейф — как нестерильная область их выселения.

Общий список идентифицированных ледовых водорослей в районах А-18 и В-21 насчитывает 36 видов, среди которых доминируют диатомовые водоросли — 29 видов, динофитовые — 6 видов и 1 вид желтозеленых (табл. 3). Среди диатомовых доминировали пеннатные виды, центрические встречались редко и малочисленно. Появление во льду 11 редких видов, вероятно, связано с включением планктонных водорослей в ледовую матрицу при дрейфе льда через акватории шельфовых сибирских морей, где заметно влияние речных стоков, несущих пресноводную и солоноватоводную флору [38, 39, 40, 41]. Выявленные единичные виды составляют аллохтонную группу флористического сообщества. Основу автохтонной группы

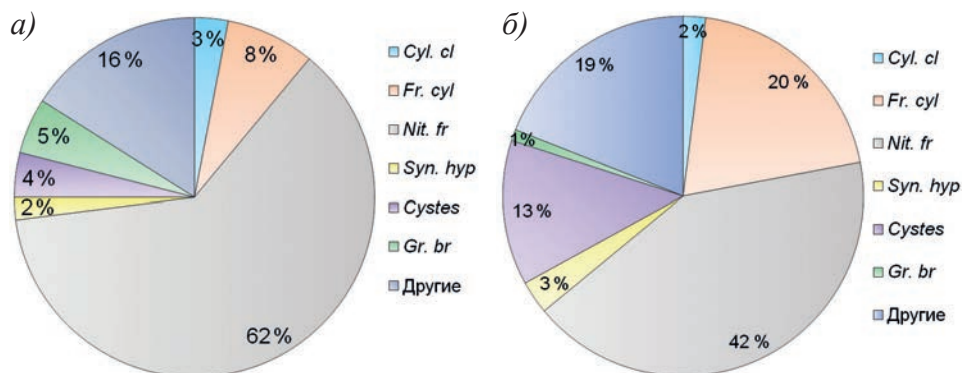


Рис. 4. Доля доминирующих видов (%) в общей численности водорослей в районах А-18 (а) и В-21 (б). Обозначения: *Cylindrotheca closterium* (Cyl. cl), *Fragilariopsis cylindrus* (Fr. cyl), *Nitzschia frigida* (Nit. fr), *Synedropsis hyperborean* (Syn. hyp), *Cystes*, *Groenlandiella brevispina* (Gr. br)

Fig. 4. The percentage of dominant species (%) in the total number of algae in areas A-18 (a) and B-21 (b). Designations: *Cylindrotheca closterium* (Cyl. cl), *Fragilariopsis cylindrus* (Fr. cyl), *Nitzschia frigida* (Nit. fr), *Synedropsis hyperborean* (Syn. hyp), *Cystes*, *Groenlandiella brevispina* (Gr. br)

составляют постоянно встречающиеся виды водорослей, как в настоящем исследовании, так и встречавшиеся ранее в ледяном покрове Центрального Арктического бассейна: *Cylindrotheca closterium*, *Fragilariopsis cylindrus*, *Navicula directa*, *Nitzschia frigida*, *Nitzschia* sp., *Synedropsis hyperborea*, цисты динофитовых и желтозеленая *Groenlandiella brevispina* [13, 15, 19, 20, 42, 43]. В автохтонной группе ледовых водорослей на долю пеннатных диатомей приходится 75 % от общей численности водорослей в районах А-18 и В-21, среди которых на долю двух видов *Nitzschia frigida* и *Fragilariopsis cylindrus* приходится, соответственно, 70 % и 62 % (рис. 4).

При расчете индексов сходства между флористическими сообществами не учитывались 11 видов, единожды встреченных в районах исследования. Учитывались только виды, встреченные 2–3 раза одновременно в каждой из совокупностей водорослей в районах А-18 и В-21 (табл. 4).

Таблица 4

**Индекс видового сходства Соренсена–Чекановского (Ks)
между сообществами ледовых водорослей в районах А-18 и В-21**

Table 4

Sorensen–Chekanovsky Species Similarity Index (Ks) between ice algae communities in areas A-18 and B-21						
Сходство внутри районов А-18 и В-21						
Ледяные керны в районах	A1	A2	A3	B1	B2	B3
Суммарное число видов	16	15	20	16	16	23
Число общих видов	13			17		
Ks	0,68			0,81		
Сходство между районами А-18 и В-21						
Суммарное число видов	26			29		
Число общих видов	10					
Ks	0,36					

В районе А-18 выявлено 13 общих видов: диатомовые *Cylindrotheca closterium*, *Entomoneis kjellmanii*, *Fragilariopsis cylindrus*, *F. oceanica*, *Navicula directa*, *Navicula transitans*, *Nitzschia frigida*, *Nitzschia pellucida*, *Nitzschia* sp., *Synedropsis hyperborea*, динофитовые *Amylax triacantha*, *Cystes* и желтозеленая *Groenlandiella brevispina*. Индекс видового сходства между сообществами на полигонах А1, А2 и А3 составил 0,68. В районе В-21 выявлено 17 общих видов: диатомовые *Rhizosolenia setigera*, *Cylindrotheca closterium*, *Diploneis litoralis*, *Entomoneis kjellmanii*, *Fragilariopsis cylindrus*, *Navicula directa*, *Navicula transitans*, *Navicula vanhoeffenii*, *Navicula* sp., *Nitzschia arctica*, *Nitzschia frigida*, *Nitzschia* sp., *Pennatae* sp., *Pseudonitzschia delicatissima*, *Synedropsis hyperborea*, цисты динофитовых и желтозеленая *Groenlandiella brevispina*. Индекс видового сходства между водорослями на полигонах В1, В2 и В3 составляет 0,81.

Между районами А-18 и В-21 индекс видового сходства флористических ледовых сообществ районов составляет 0,36. Из идентифицированных водорослей, соответственно, 26 и 29 видов общими были 10 видов: диатомовые *Cylindrotheca closterium*, *Entomoneis kjellmanii*, *Fragilariopsis cylindrus*, *Navicula directa*, *Navicula transitans*, *Nitzschia frigida*, *Nitzschia* sp., *Synedropsis hyperborea*, цисты динофитовых и желтозеленая *Groenlandiella brevispina*.

Встает закономерный вопрос: в чем причина или какие факторы среды определяют высокое сходство между флористическими сообществами внутри районов А-18 и В-21 (0,69 и 0,81) и низкое видовое сходство сообществ между районами (0,36).

В 2018 г. полевые работы пришлось на середину сентября, на период завершения сезона таяния, на момент минимума распространения ледяного покрова. В районе еще наблюдалась разрушенность и не наблюдалось интенсивное ледообразование, начальные виды льда встречались редко и только среди достаточно сплоченных однолетних льдов, переживших период таяния. В 2021 г. основные экспедиционные работы пришлось на конец сентября — начало октября, ледообразование уже началось и было достаточно интенсивным, 74 % всего наблюдавшегося в экспедиции льда было вновь образованным, т. е. преобладали молодые и начальные льды [34]. За исключением западной точки В3, точки отбора проб на полигонах в каждом районе располагались компактно. Гидрологические характеристики подледного 0–50 м водного слоя сохранялись в точках А1, А2, А3 и В1, В2, кроме точки В3 в сезон 2021 г., где летом сформировался очень теплый прогретый слой до глубины 40 м (см. рис. 4). Сходные условия состояния водно-ледовой среды внутри районов, вероятно, явилось ключевым фактором, определяющим высокое видовое сходство между флористическими сообществами внутри районов.

Возможной причиной низкого сходства флористических сообществ между районами является климатический фактор, вследствие трехлетней разницы между выполненными исследованиями. Аномалия температуры воздуха (отклонение от среднего за 1961–1990) в летний период 2018 г. составила 0,9 °С. При этом одна из наибольших аномалий наблюдалась в районе исследования экспедиций NABOS, в Восточносибирском районе северной полярной области, и составила 2,4 °С [31]. В 2021 г. аномалия температуры воздуха летнего периода в широтной зоне 70–85° с. ш. составила 1,2 °С, что несколько больше, чем в 2018 г. В летнем сезоне основная область крупных положительных аномалий температуры находилась в евразийском секторе, а в Восточносибирском районе составила 2,9 °С [32]. Сезон 2021 г. был теплее сезона 2018 г., что, вероятно, отразилось на интенсивности таяния и толщине льда. В среднем толщина отобранного для исследования льда составила 192 см в А-18 и 60 см в В-21, что, соответственно, отразилось на формировании видового разнообразия и обилии водорослей.

Рассмотренные выше данные о физическом состоянии водно-ледовой среды и составе ледовых водорослей касаются районов продуцирования однолетних льдов. В соответствии с биогеографическими представлениями о структуре ареалов океанических сообществ [37], районы А-18 и В-21 можно рассматривать как основу ареалов, где формируются ледовые флористические сообщества, которые затем попадают в Трансарктическую зону и переносятся в центральные районы СЛЮ Трансарктическим течением в направлении к проливу Фрама. Имеющиеся данные мониторинга видового состава ледовых водорослей, полученные в околополюсном районе СЛЮ в апреле 2007–2011, 2015, 2018 гг. [13, 15, 19, 20], позволяют сделать сравнение состояния сообществ в зонах формирования и выноса морского льда. Все полевые и методические подходы сбора и обработки собранных материалов сохранялись. В качестве индикаторов выбраны центрические и пеннатные диатомовые водоросли, доминирующие в составе ледовых флористических сообществ. Данные численности и видового сходства водорослей двух ключевых диатомовых групп Centricae и Pennatae представлены в табл. 5.

Видовой состав водорослей в околополюсном районе — это реплика процессов формирования ледовых флористических сообществ в центральных районах Арктического бассейна. Здесь выявлено заметное различие численности видов в обеих группах за весь период наблюдений, причем оно проявляется как среди центрических от 12 видов до полного их отсутствия, так и среди пеннатных диатомовых от 5 до 27 видов (см. табл. 5). Отмечено также низкое видовое сходство между последова-

Таблица 5

Общее количество видов и индексы видового сходства Ks в группах Centricae и Pennatae между последовательными годовыми парами в период исследований в околополюсном районе СЛО в 2007–2011, 2015, 2018 гг.

Table 5

The species total number and species similarity indices Ks in the Centricae and Pennatae groups between consecutive annual pairs during the period of studies in the near-polar region of the AO in 2007–2011, 2015, 2018

Группа	2007	2008	2009	2010	2011	2015	2018
Centricae	12	6	8	7	4	3	NF
Pennatae	24	5	16	10	14	27	5
Ks между годовыми парами наблюдений	0,13						
		0,17					
			0,19				
				0,17			
					0,13		
						0,06	

Примечание. NF — не обнаружено.

Note. NF — not found.

тельными годовыми парами в диапазоне 0,06–0,19. Чередование теплых и холодных сезонов в современном СЛО предполагает влияние климатического фактора на формирование видового состава водорослей. Так, выявленное низкое видовое сходство между сообществами в районах А-18 и В-21 (см. табл. 4), формировавшимися в холодный и теплый периоды, может быть косвенным подтверждением влияния этого важного фактора. Кроме того, формирование видового сообщества зависит от того, как происходит образование льда — на открытой воде или на остаточном льду после летнего таяния. В первом случае видовой состав ледового сообщества зависит от разнообразия планктонных водорослей в момент формирования ледовой матрицы, а во втором — от водорослей, сохранившихся во льду после летнего таяния, и водорослей, включающихся в лед из подледного водного слоя по мере его продвижения в зоне Трансарктического дрейфа.

Два керна, отобранные в околополюсном пространстве 5 апреля 2009 г. в пределах одного ледяного массива, составленного из ледяных полей разного генезиса, есть реплика процессов формирования видового состава в октябре предыдущего 2008 г. в Центральном Арктическом бассейне [15].

Первый керн толщиной 198 см имеет текстурные и соленостные признаки, характерные для льда при образовании из морской воды, например, в трещинах и разводах. Ледообразование проходит в период полярной ночи, когда фотосинтез отсутствует, что отражается на низком качественном и количественном разнообразии планктонных водорослей и, как следствие, на численности и составе ледовых водорослей. Было идентифицировано 5 видов центрических *Chaetoceros compressus*, *C. decipiens*, *C. diadema*, *Rhizosolenia hebetata* f. *semispina*, *Thalassiosira* sp. и 2 вида пеннатных диатомовых водорослей *Cylindrotheca closterium* и *Fragilariopsis oceanica*. В целом для всего керна льда были выявлены виды с высокой численностью клеток в группе Centricae в диапазоне 4,6–5,9 тыс. кл/л и низкой численностью 0,1–0,7 тыс. кл/л в группе Pennatae.

Второй керн представляет собой комбинацию, составленную из остаточного после летнего таяния верхнего слоя льда толщиной 40 см и ниже выросшего за зиму



Рис. 5. Ледяные керны, отобранные в околополюсном районе в пределах одного ледяного массива (05.04 2009, 89° 43,5' с. ш., 41° 06' в. д.). На снимке справа отмечен бурый слой, разделяющий старый и новообразовавшийся слои (объяснения в тексте)

Fig. 5. Ice cores obtained in the near-polar region within the same sea ice massive (05.04 2009, 89°43.5' N, 41°06' E). The right image shows a brown layer separating the old and newly formed layers (explanations in the text)

нового слоя, разделенных бурым слоем толщиной 5–6 см. Появление бурого слоя в толще льда является следствием развития диатомовых водорослей на нижней (морской) поверхности остаточного льда в осенний период. С наступлением похолодания в октябре и дальнейшим зимним нарастанием нового льда на нижней поверхности старого этот бурый (диатомовый) слой оказывается внедренным в структуру ледяного керна, достигшего к апрелю толщины 203 см. Общий список включает 8 центрических и 17 пеннатных диатомовых водорослей. По обилию клеток доминируют пеннатные диатомеи *Fossula arctica*, *Navicula transitans*, *Nitzschia frigida*, *Pseudo-nitzschia* cf. *granii* с численностью 710–18121 тыс. кл/л, а среди центрических *Detonula confervaceae* и *Thalassiosira antarctica* var. *borealis* с численностью 72–316 тыс. кл/л.

Отмечено значительное различие в численности видов между ледяными кернами: 7 видов с доминированием центрических водорослей в первом и 25 видов с доминированием пеннат во втором, причем между сообществами в пределах одного ледяного массива не отмечено ни одного общего вида. Показателен результат наблюдений, выполненных в апреле 2018 г. в околополюсном районе [21] и в настоящем исследовании в сентябре 2018 г. в период работ программы NABOS [22]. В первом случае суммарное число видов составило 5, а во втором — 26 видов, причем общим для обоих наблюдений был только один вид — *Nitzschia frigida*. Выявленные различия свидетельствуют о формировании независимых друг от друга флористических сообществ в современных условиях изменяющейся физической среды в Арктическом бассейне.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях современной климатической нестабильности в СЛО важно оценивать состояние биологических сообществ, населяющих водно-ледовую среду. В настоящем исследовании в качестве индикаторов изменений выбраны центрические и пеннатные диатомовые водоросли, доминирующие в ледовых флористических сообществах. Анализ показал значительные различия в видовом составе и обилии водорослей между сезонами, что свидетельствует о формировании независимых друг от друга флористических сообществ в современных условиях изменяющейся

физической среды в центральных районах СЛО, что подтверждает ранее полученные наблюдения в период 2007–2011, 2015 и 2018 гг. [14, 15, 16, 17, 19, 21]. Обсуждаемые здесь материалы получены в короткий период времени и на ограниченных пространствах в зонах продуцирования однолетних льдов на акваториях шельфовых морей и зонах выноса в центральные районы СЛО. Вместе с тем краткосрочные наблюдения дают «мгновенную» информацию о качественном и количественном состоянии ледовых биологических сообществ. Для получения достоверной оценки необходимы длительные наблюдения, которые, возможно, будут организованы в ближайшее время на новых логистических подходах в изучении морской Арктики.

Конфликт интересов. Конфликт интересов отсутствует.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке темы Госзадания № 0149–2018–0009.

Благодарности. Настоящее исследование состоялось благодаря поддержке рейсов программой NABOS и ее руководителем И. Поляковым. Все полевые работы в экспедициях выполняли сотрудники ААНИИ А.А. Абрамов, В.Л. Кузнецов и В.В. Поважный. Всем перечисленным сотрудникам выражается глубокая благодарность за организацию, проведение полевых работ и обработку собранных материалов.

Competing interests. The authors have no competing interests.

Funding. The article was supported by State Assignment № 0149–2018–0009.

Acknowledgments. This study was carried out with the support by the NABOS program and its head I. Polyakov. All the field work in the expeditions was carried out by the AARI employees Abramov A., Kuznetsov V. and Povazhny V. Deep gratitude is expressed to all the employees listed for organizing and conducting the work and processing the materials collected.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Comiso J.J. Large decadal decline of the arctic multiyear ice cover // J. Clim. 2012. V. 25. P. 1176–1193. doi: 10.1175/JCLI-D-11-00113.1.
2. Petty A.A., Stroeve J.C., Holland P.R., Boisvert L.N., Bliss A.C., Kimura N., Meier W.N. The Arctic sea ice cover 2016: a year of record-low highs and higher-than-expected lows // The Cryosphere. 2018. V. 12 (2). P. 433–453. doi: 10.5194/tc-12-433-2018.
3. Алексеев Г.В., Радионов В.Ф., Александров Е.И., Иванов Н.Е., Харланенкова Н.Е. Изменение климата Арктики при глобальном потеплении // Проблемы Арктики и Антарктики. 2015. № 1 (103). С. 32–42.
4. Kwok R., Untersteiner N. The thinning of Arctic sea ice // Phys. Today. 2011. V. 64. P. 36–41. doi: 10.1063/1.3580491.
5. Иванов В.В., Алексеев В.А., Алексеева Т.А., Колдунов Н.В., Репина И.А., Смирнов А.В. Арктический ледяной покров становится сезонным? // Исследования Земли из Космоса. 2013. Т. 4. С. 50–65.
6. Виноградная Е. С., Егорова Е. С., Шевелева Т.В., Юлин А.В. Изменчивость положения границ старых льдов в весенний период и остаточных льдов в осенний период в Северном Ледовитом океане в текущем климатическом периоде // Российская Арктика. 2020. № 9. С. 41–55.
7. Haas C., Howell S. Ice thickness in the Northwest Passage // Geophysical Research Letters. 2015. V. 42. № 18. P. 7673–7680. doi: 10.1002/2015GL065704.
8. Ricker R., Hendricks S., Kaleschke L., Tian-Kunze X., King J., Haas C. A weekly Arctic sea-ice thickness data record from merged CryoSat-2 and SMOS satellite data // The Cryosphere. 2014. V. 11. P. 1607–1623. doi: 10.5194/tc-11-1607-2017.

9. Stroeve J.C., Schroeder D., Tsamados M., Feltham D. Warm winter, thin ice? // *The Cryosphere*. 2018. V. 12. P. 1791–1809. doi: 10.5194/tc-12-1791-2018.
10. Смоляницкий В.М., Тюряков А.Б., Фильчук К.В., Фролов И.Е. Сравнительный анализ прямых измерений толщин льда и высот снега, наблюдений Cryosat-2 и численных оценок системы PIOMAS // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2020. Т. 66 (3). С. 337–348. doi: 10.30758/0555-2648-2020-66-3-337-348.
11. Тимофеева А.Б., Шарафутдинова М.В. Многолетняя изменчивость толщины припая в море Лаптевых по данным полярных станций // *Российская Арктика*. 2021. № 12. С. 62–76. doi: 10.24412/2658-4255-2021-1-62-76.
12. Мельников И.А. Экосистема арктического морского льда. М.: Наука, 1989. 192 с.
13. Мельников И.А. Современная экосистема арктического морского льда: динамика и прогноз // *Доклады РАН*. 2008. Т. 423 (6). С. 817–820.
14. Hop H., Vihtakari M., Bluhm B., Poulin M., von Quillfeldt C.H., Assmy P., Peeken I., Olsen L., Gradinger R., Zhitina L., Melnikov I. Microalgae and other unicellular eukaryotes in drifting sea ice in the Arctic Ocean from the 1980s to 2010 // *Frontiers in Marine Science*. 2020. V. 7 (243). P. 1–18.
15. Мельников И.А., Гогорев Р.М. Оценка состояния экосистемы морского льда центрального Арктического бассейна по данным наблюдений в период проведения МПП // *Наземные и морские экосистемы*. М.: Paulsen, 2011. с. 498–111.
16. Мельников И.А., Житина Л.С., Семенова Т.Н. Современное состояние биоразнообразия морского льда в районе Северного полюса // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2016. № 4 (110). С. 104–110.
17. Assmy P., Bluhm B., Gradinger R., Hop H., Melnikov I., Olsen L., Peeken I., Poulin M., Vihtakari M., von Quillfeldt C.H., Zhitina L. Unicellular eukaryotes in Sea ice in the central Arctic from the 1980s-2010s: a changing community? // *Frontiers in Marine Science*. 2018. V. 7. Paper 243. doi: 10.3389/fmars.2020.00243.
18. Bluhm B., Hop H., Vihtakari M., Gradinger R., Quillfeldt C., Melnikov I., Collins E., Poulin M., Pedersen T.J. Sea ice biota // *CAFF Monitoring Series Report*. 2017. № 1. P. 33–61.
19. Мельников И.А. Оценка современного состояния и особенностей формирования биоты арктического морского льда: по материалам мониторинга в районе Северного полюса // *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*. 2017. Т. 28. № 1. С. 83–97.
20. Мельников И.А. Характеристика биоразнообразия современного морского льда в районе Северного полюса // *Доклады РАН*. 2018. Т. 480 (5). С. 596–600.
21. Мельников И.А. Мониторинг водно-ледовой экологической системы в районе Северного полюса (апрель 2018) // *Российские полярные исследования: Информационно-аналитический сборник*. 2018. Т. 2 (32). С. 13–14.
22. Мельников И.А. Мониторинг водно-ледовой экосистемы центрального Арктического бассейна в период экспедиции на НЭС «Академик Трешников» (август-сентябрь 2018) // *Океанографические исследования*. 2018. Т. 46 (3). С. 16–21.
23. WMO Sea-Ice Nomenclature. WMO, 2014, No. 259.
24. Horner R., Ackley S.F., Dieckmann G.S., Gulliksen B., Hoshiai T., Legendre L., Melnikov I.A., Reeburgh W.S., Spindler M., Sullivan C.W. Ecology of the sea ice biota. Habitat, terminology, and methodology // *Polar Biol*. 1992. V. 12. P. 417–427.
25. Усачев П.И. Микрофлора полярных льдов // *Тр. ИО АН СССР*. 1949. Т. 3. С. 216–259.
26. Киселев И.А. Планктон морей и континентальных водоемов. Л.: Наука, 1969. Т. 1. 657с.
27. Мельников И.А. Кробиобиологические наблюдения в Центральном Арктическом бассейне (метод и некоторые результаты исследований) // *Океанология*. 1979. Т. 19 (1). С. 150–155.

28. *Utermöhl H.* Neue Wege in der quantitativen Erfassung des Planktons (mit besonderer Berücksichtigung des Ultraplanktons) // *Vehr. int. Ver. theor. angew. Limnol.* 1931. V. 5 (2). P. 567–569.
29. *Песенко Ю.А.* Принципы и методы количественного анализа в фаунистических исследованиях. М.: Наука, 1982. 288 с.
30. Обзор гидрометеорологических процессов в северной полярной области 2018 / Под редакцией д-ра геогр. наук А.С. Макарова. СПб.: ААНИИ, 2019. 102 с.
31. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2018 г. М., 2019. 79 с.
32. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2021 г. М., 2022. 104 с.
33. Наблюдения за ледовой обстановкой: Учебное пособие. СПб.: ААНИИ, 2009. 360 с.
34. *Тимофеева А.Б.* Ледовые условия плавания в экспедиции NABOS-2021 в сентябре-октябре 2021 года // *Российская Арктика.* 2021. № 15. С. 54–67.
35. *Ivanov V.* Physical oceanography from CTD measurements during Akademik Tryoshnikov cruise AT2018 to the Arctic Ocean // *PANGAEA.* 2019. doi: 10.1594/PANGAEA.905471.
36. *Гордиенко П.А.* Дрейф льдов в центральной части Северного Ледовитого океана // *Проблемы Севера.* 1958. № 1. С. 3–29.
37. *Беклемишев К.В.* Экология и биогеография океана. М.: Наука, 1969. 291 с.
38. *Окологдов Ю.Б.* Водоросли льдов Восточно-Сибирского моря в мае 1987 г. // *Новости систематики низших растений.* Л.: Наука, 1989. Т. 26. С. 36–41.
39. *Окологдов Ю.Б.* Водоросли льдов моря Лаптевых в мае 1988 и 1989 гг. // *Новости систематики низших растений.* Л.: Наука, 1989. Т. 28. С. 25–31.
40. *Окологдов Ю.Б.* Водоросли льдов Чукотского моря в марте-апреле 1988 г. // *Новости систематики низших растений.* Л.: Наука, 1990. Т. 27. С. 16–20.
41. *Okolodkov Yu.B.* Cryopelagic flora of the Chukchi, East Siberian and Laptev seas // *Proc. NIPR Symp. Polar Biol.* 1992. V. 5. P. 28–43.
42. *Melnikov I.A., Kolosova L.G., Welch H.E., Zhitina L.S.* Sea ice biological communities and nutrient dynamics in the Canadian Basin of the Arctic Ocean // *Deep-Sea Research.* 2002. V. 1 (49). P. 1623–1649.
43. *Ильяш Л.В., Житина Л.С.* Сравнительный анализ видового состава диатомовых водорослей льдов морей Российской Арктики // *Общ. биол.* 2009. Т. 70. № 2. С. 143–154.

REFERENCES

1. *Comiso J.J.* Large decadal decline of the arctic multiyear ice cover. *J. Clim.* 2012, 25: 1176–1193. doi: 10.1175/JCLI-D-11-00113.1.
2. *Petty A. A., Stroeve J. C., Holland P. R., Boisvert L. N., Bliss A. C., Kimura N., Meier W. N.* The Arctic sea ice cover 2016: a year of record-low highs and higher-than-expected lows. *The Cryosphere.* 2018, 12 (2): 433–453. doi: 10.5194/tc-12-433-2018.
3. *Alekseev G.V., Radionov V.F., Alexandrov E.I., Ivanov N.E., Kharlanenkova N.E.* Climate change in the Arctic under global warming. *Problemy Arktiki i Antarktiki.* Arctic and Antarctic Research. 2015, 1 (103): 32–42. [In Russian].
4. *Kwok R., Untersteiner N.* The thinning of Arctic sea ice. *Phys. Today.* 2011, 64: 36–41. doi: 10.1063/1.3580491.
5. *Ivanov V.V., Alexeev V.A., Alekseeva T.A., Koldunov N.V., Repina I.A., Smirnov A.V.* Does Arctic ocean ice cover become seasonal? *Issledovanie Zemli iz Kosmosa.* Exploring the Earth from Space. 2013, 4: 50–65. [In Russian].

6. Vinogradnaya E.S., Egorova E.S., Sheveleva T.V., Yulin A.V. Variability of the spring old ice and fall residual ice boundary in the Arctic Ocean over the current period of climate changes. *Rossiyskaya Arktika*. Russian Arctic. 2020, 9: 41–55. doi: 10.24411/2658-4255-2020-12094. [In Russian].
7. Haas C., Howell S. Ice thickness in the Northwest Passage. *Geophysical Research Letters*. 2015, 42 (18). doi: 10.1002/2015GL065704.
8. Ricker R., Hendricks S., Kaleschke L., Tian-Kunze X., King J., Haas C. A weekly Arctic sea-ice thickness data record from merged CryoSat-2 and SMOS satellite data. *The Cryosphere*. 2017, 11: 1607–1623. doi: 10.5194/tc-11-1607-2017.
9. Stroeve J.C., Schroeder D., Tsamados M., Feltham D. Warm winter, thin ice? *The Cryosphere*. 2018, 12: 1791–1809. doi: 10.5194/tc-12-1791-2018.
10. Smolyanitsky V.M., Turyakov A.B., Filchuk K.V., Frolov I.E. Comparison of direct measurements of sea ice thickness and snow height, CryoSat-2 observations and PIOMAS numerical estimates. *Problemy Arktiki i Antarkтики*. Arctic and Antarctic Research. 2020, 66 (3): 337–348. doi: 10.30758/0555-2648-2020-66-3-337-348. [In Russian].
11. Timofeeva A.B., Sharatunova M.V. Multiyear variability of the fast ice thickness in the Laptev Sea according to the polar stations data. *Rossiyskaya Arktika*. Russian Arctic. 2021, 12: 62–76. doi: 10.24412/2658-4255-2021-1-62-76. [In Russian].
12. Melnikov I.A. *Ekosistema arkticheskogo morskogo l'da*. Ecosystem of Arctic sea ice. Moscow: Nauka, 1989: 192 p. [In Russian].
13. Melnikov I.A. Modern Arctic sea ice ecosystem: dynamics and forecast. *Reports of the Russian Academy of Sciences*. 2008, 423 (6): 817–820 [In Russian].
14. Hop H., Vihtakari M., Bluhm B., Poulin M., C. von Quillfeldt, Assmy P., Peeken I., Olsen L., Gradinger R., Zhitina L., Melnikov I. Microalgae and other unicellular eukaryotes in drifting sea ice in the Arctic Ocean from the 1980s to 2010. *Frontiers in Marine Science*. 2020, 7 (243): 1–18.
15. Melnikov I.A., Gogorev R.M. Assessment of the sea ice ecosystem conditions in the Central Arctic basin according to observations during the IPY. *Nazemnye i morskije ekosistemy*. Terrestrial and marine ecosystems. Moscow: Paulsen, 2011: 498–111. [In Russian].
16. Melnikov I.A., Zhitina L.S., Semenova T.N. The current sea ice biodiversity conditions of the North Pole region. *Problemy Arktiki i Antarkтики*. Arctic and Antarctic Research. 2016, 4 (110): 104–110. [In Russian].
17. Assmy P., Bluhm B., Gradinger R., Hop H., Melnikov I., Olsen L., Peeken I., Poulin M., Vihtakari M., C. von Quillfeldt, Zhitina L. Unicellular eukaryotes in Sea ice in the central Arctic from the 1980s-2010s: a changing community? *Frontiers in Marine Science*. 2018, 7: 243. doi: 10.3389/fmars.2020.00243.
18. Bluhm B., Hop H., Vihtakari M., Gradinger R., Quillfeldt C., Melnikov I., Collins E., Poulin M., Pedersen T.J. Sea ice biota. In: *CAFF Monitoring Series Report*. 2017, 1: 33–61.
19. Melnikov I.A. Assessment of the current conditions and features of the Arctic sea ice biota formation: based on monitoring data in the North Pole region. *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem*. Problems of ecological monitoring and ecosystem modeling. 2017, 28 (1): 83–97. [In Russian].
20. Melnikov I.A. Biodiversity characteristics of the recent sea ice in the North Pole region. *Doklady RAN*. Reports of the Russian Academy of Sciences. 2018, 480 (5): 596–600. [In Russian].
21. Melnikov I.A. Monitoring of the water-ice ecological system in the North Pole region (April 2018). *Rossiyskie polyarnye issledovaniya: Informacionno-analiticheskiy sbornik*. Russian Polar research: Information and analytical collection. 2018, 2 (32): 13–14. [In Russian].
22. Melnikov I.A. Monitoring of the water-ice ecosystem of the Central Arctic basin during the expedition at R/V “Akademik Treshnikov” (August-September 2018). *Okeanologicheskie issledovaniya*. Oceanological research. 2018, 46 (3): 16–21. [In Russian].
23. WMO Sea-Ice Nomenclature. WMO, 2014, No. 259.

24. Horner R., Ackley S.F., Dieckmann G.S., Gulliksen B., Hoshiai T., Legendre L., Melnikov I.A., Reeburgh W.S., Spindler M., Sullivan C.W. Ecology of the sea ice biota. Habitat, terminology, and methodology. *Polar Biol.* 1992, 12: 417–427.
25. Usachev P.I. Microflora of polar ice. *Trudy Akademii Nauk SSSR*. Transactions Academy of sciences USSR. 1949, 3: 216–259. [In Russian].
26. Kiselev I.A. *Plankton morej i kontinental'nykh vodoemov*. Plankton of seas and continental reservoirs. Leningrad: Nauka, 1969. V. 1: 657 p. [In Russian].
27. Melnikov I.A. Microbiological observations in the Central Arctic basin (method and some research results). *Okeanologia*. Oceanology. 1979, 19 (1): 150–155. [In Russian].
28. Utermöhl H. Neue Wege in der quantitativen Erfassung des Planktons (mit besonderer Berücksichtigung des Ultraplanktons). *Vehr. int. Ver. theor. angew. Limnol.* 1931, 5 (2): 567–569.
29. Pesenko Yu.A. *Principy i metody kolichestvennogo analiza v faunisticheskikh issledovaniyakh*. Principles and methods of quantitative analysis in faunal studies. Moscow: Nauka, 1982: 288 p. [In Russian].
30. *Obzor gidrometeorologicheskikh processov v severnoj polyarnoj oblasti 2018*. Review of Hydrometeorological processes in the Northern Polar region 2018. Edited by A.S. Makarov. St. Petersburg: AARI, 2019, 102 p. [In Russian].
31. *Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossijskoj Federacii za 2018 g.* Report on climate features on the territory of the Russian Federation for 2018. Moscow, 2019: 79 p. [In Russian].
32. *Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossijskoj Federacii za 2021 g.* Report on climate features on the territory of the Russian Federation for 2022. Moscow, 2022: 104 p. [In Russian].
33. *Nabljudeniya za ledovoj obstanovkoj: uchebnoe posobie*. Observations of ice conditions: manual. St. Petersburg: AARI, 2009: 360 p. [In Russian].
34. Timofeeva A.B. Ice conditions of navigation during the NABOS-2021 expedition in September–October 2021. *Rossiyskaya Arktika*. Russian Arctic. 2021, 15: 54–67. doi:10.24412/2658-4255-2021-4-54-67. [In Russian].
35. Ivanov V. Physical oceanography from CTD measurements during Akademik Tryoshnikov cruise AT2018 to the Arctic Ocean. PANGAEA. 2019. Available at: doi: 10.1594/PANGAEA.905471.
36. Gordienko P.A. Ice drift in the central part of the Arctic Ocean. *Problemy Severa*. Problems of the North. 1958, 1: 3–29. [In Russian].
37. Beklemishev K.V. *Ekologiya i biogeografiya okeana*. Ecology and biogeography of the ocean. Moscow: Nauka, 1969: 291p. [In Russian].
38. Okolodkov Yu.B. Algae of the East Siberian Sea ice in May 1987. *Novosti sistematiki nizshih rastenij*. News of the systematics of lower plants. Leningrad: Nauka, 1989, 26: 36–41. [In Russian].
39. Okolodkov Yu.B. Algae of the Laptev Sea ice in May 1988 and 1989. *Novosti sistematiki nizshih rastenij*. News of the systematics of lower plants. Leningrad: Nauka, 1989, 28: 25–31. [In Russian].
40. Okolodkov Yu.B. Algae of the ice of the Chukchi Sea in March–April 1988. *Novosti sistematiki nizshih rastenij*. News of the systematics of lower plants. Leningrad: Nauka, 1990, 27: 16–20. [In Russian].
41. Okolodkov Yu.B. Cryopelagic flora of the Chukchi, East Siberian and Laptev seas. *Proc. NIPR Symp.* *Polar Biol.* 1992, 5: 28–43.
42. Melnikov I.A., Kolosova L.G., Welch H.E., Zhitina L.S. Sea ice biological communities and nutrient dynamics in the Canadian Basin of the Arctic Ocean. *Deep-Sea Research*. 2002, 1 (49): 1623–1649.
43. Ilyash L.V., Zhitina L.S. Comparative analysis of the species composition of diatoms of the ice of the seas of the Russian Arctic. *Obshchaya Biologiya*. General Biology. 2009, 70 (2): 143–154. [In Russian].

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ ЖУРНАЛА «ПРОБЛЕМЫ АРКТИКИ И АНТАРКТИКИ»

В журнале публикуются статьи по тематике исследований полярных областей, а также научные сообщения теоретического, методического, экспериментального и прикладного характера, тематические обзоры (по заказу редакции), критические статьи и рецензии, библиографические сводки, хроника научной жизни. Тексты статей должны быть на русском или английском языке. Принимаются статьи, ранее не опубликованные и не находящиеся на рассмотрении в других изданиях.

Все материалы направляются в редакцию в электронном виде он-лайн 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.

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. 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 пишутся ключевые слова в соответствии с английским алфавитом (не более 10 слов и не более двух слов в сочетаниях) и авторское Summary статьи на 20–25 строк (здесь же для контроля обязательно прилагается перевод Summary на русский язык).

Ключевые слова должны отражать основное содержание статьи, повторять термины из текста статьи и по возможности не повторять термины заглавия; следует помнить, что эти слова должны облегчить поиск статьи средствами информационно-поисковой системы.

Summary 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 Summary 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 Summary должны быть структурированными, т.е. отражать кратко проблему исследования и ее состояние, цель работы, методы, результаты и заключение.

Далее продолжается информация на русском языке: ключевые слова в соответствии с русским алфавитом (не более 10), краткая аннотация (7–10 строк) (без перевода на английский) и начинается текст статьи.

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, постановка проблемы, 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 словесные надписи на рисунках даются только 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.

В *списке литературы* (под заголовком «Список литературы») ссылки на литературу нумеруются последовательно, в соответствии с порядком их первого упоминания в тексте. Приводятся только опубликованные работы. Ссылки по тексту даются в квадратных скобках на номера списка, через запятую с пробелом: [1, 7, 23–27]. Статья должна содержать ссылки на все работы, приведенные в списке литературы. Количество источников должно быть не менее 10. Обращаем внимание на недопустимость включения в список литературы изданий, выпущенных без ISSN- или ISBN-кодов (этим часто грешат сборники материалов конференций (тезисы или доклады), а также авторефератов диссертаций и диссертаций, архивных и фондовых материалов, научно-технических отчетов, учебников и учебных пособий, ГОСТов, распоряжений и пр. Количество ссылок на научно-популярные издания должно быть минимальным.

Количество самоцитирований должно быть не более 10–12 % от общего количества ссылок на оригинальные источники.

Далее прилагается второй список литературы (References). В списке на латинице строго сохраняются те же последовательность и нумерация источников, что и в «традиционном» списке. Ссылки на иностранные источники приводятся в обоих списках литературы.

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 27.06.2022
Формат 70×100 1/16
Тираж 75

Печать цифровая
Печ. л. 7,5
Заказ №

Отпечатано ИП Келлер Т.Ю.,
194044, Россия, Санкт-Петербург, ул. Менделеевская, 9.

Signed to print 27.06.2022
Format 70×100 1/16
Edition 75

Digital Printing
Ps. 7,5
Order No

Printed IE Keller T.Yu.,
194044, Russia, St. Petersburg, Mendeleevskaia str., 9.