

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, № 1, 2022

ARCTIC AND ANTARCTIC RESEARCH

Volume 68, No 1, 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.Л. 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)

чл.-корр. 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 РАН В.Ф. Логинов (Минск, Беларусь)

д-р физ.-мат. наук А.П. Макшtas (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)

чл.-корр. 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 25.00.25, 25.00.27, 25.00.28, 25.00.29, 25.00.30, 25.00.31.

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
Leonid P. Bobylev, Cand. of Sci., St. Petersburg, Russia
Kirill V. Chistyakov, Dr. of Sci., St. Petersburg, Russia
Stanislav G. Denisenko, Dr. of Sci., St. Petersburg, Russia
Dmitry V. Divine, Cand. of Sci., Tromsø, Norway
Sergey A. Dobrolyubov, RAS corr. member, Moscow, Russia
Elena O. Dubinina, RAS corr. member, Moscow, Russia
Nikolay N. Filatov, RAS corr. member, Petrozavodsk, Russia
Mikhail V. Flint, academician, Dr. of Sci., Moscow, Russia
Mikhail N. Grigoriev, Dr. of Sci., Yakutsk, Russia
Vladimir M. Kattsov, Dr. of Sci., St. Petersburg, Russia
Boris V. Kozelov, Dr. of Sci., Murmansk, Russia
Marina O. Leibman, Dr. of Sci., Tyumen, Russia
Matti Leppäranta, Ph.D., Prof. emer., Helsinki, Finland;

Vladimir A. Likhomanov, Cand. of Sci., St. Petersburg, Russia
Vladimir F. Loginov, academician, Dr. of Sci., Minsk, Belarus
Alexander P. Makshtas, Dr. of Sci., St. Petersburg, Russia
Alexey V. Marchenko, Dr. of Sci., Longyearbyen, Norway
Evgeny U. Mironov, Dr. of Sci., St. Petersburg, Russia
Vladimir F. Radionov, Cand. of Sci., St. Petersburg, Russia
Dominique Raynaud, Prof. emer., Grenoble, France
Kirill E. Sazonov, Dr. of Sci., St. Petersburg, Russia
Konstantin G. Stavrov, Dr. of Sci., St. Petersburg, Russia
Pavel G. Talalay, Prof., Dr. of Sci., Changchun, PRC
Leonid A. Timokhov, Dr. of Sci., St. Petersburg, Russia
Oleg A. Troshichev, Dr. of Sci., St. Petersburg, Russia
Nikolay B. Vakhtin, RAS corr. member, St. Petersburg, Russia

Editorial Council:

Alexander S. Makarov, Dr. of Sci., St. Petersburg, Russia (Chair)
Valery D. Kaminsky, RAS corr. member, 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 ПИ № 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: 25.00.25, 25.00.27, 25.00.28, 25.00.29, 25.00.30, 25.00.31.

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

Обращение к редакторам и издателям российских научных журналов	6
--	---

ОКЕАНОЛОГИЯ

<i>И.М. Ашик, В.В. Алексеев, Е.В. Блошкина, М.Ю. Кулаков, М.С. Махотин, А.Д. Тарасенко, К.В. Фильчук.</i> Состояние и перспективы развития системы мониторинга гидрологических условий акватории Северного Ледовитого океана	8
<i>В.Н. Смирнов, М.С. Знаменский, И.Б.Шейкин.</i> Волновые процессы в дрейфующем льду Северного Ледовитого океана в экспедиции MOSAiC. Зимний период	26
<i>А.Д. Тарасенко, В.В. Селюженко, Н.В. Сандаюк, И.А. Абрамова, Д.М. Демчев.</i> Исследование ледовой обстановки Обской губы по современным спутниковым данным в 2007–2017 гг.....	48

МЕТЕОРОЛОГИЯ И КЛИМАТОЛОГИЯ

<i>У.В. Прохорова.</i> Оценка влияния метеорологических параметров на изменчивость площади и толщины морского льда в Карском море	64
---	----

СТРАНИЦЫ ИСТОРИИ

<i>O.V. Shabalina, K.S. Kazakova.</i> Expedition diary — insights into the history of organizing and conducting Russian Arctic expeditions in the early XX th century.....	76
---	----

Contents

Address to the editors and publishers of Russian scientific journals	6
--	---

OCEANOLOGY

<i>I.M. Ashik, V.V. Alekseev, E.V. Bloshkina, M.Yu. Kulakov, M.S. Makhotin, A.D. Tarasenko, K.V. Filchu.</i> State and development prospects of the hydrological monitoring system of the Arctic Ocean	8
<i>V.N. Smirnov, M.S. Znamensky, I.B. Sheykin.</i> Wave processes in the drifting ice of the Arctic Ocean in the MOSAiC expedition. Winter period	26
<i>A.D. Tarasenko, V.V. Selyuzhenok, N.V. Sandalyuk, I.A. Abramova, D.M. Demchev.</i> A study of sea ice regime in the Obskaya guba Bay using modern satellite data in 2007–2017	48

METEOROLOGY AND CLIMATOLOGY

<i>U.V. Prokhorova.</i> Assessing the influence of meteorological parameters on sea ice area and thickness variability in the Kara Sea	64
--	----

PAGES OF HISTORY

<i>O.V. Shabalina, K.S. Kazakova.</i> Expedition diary — insights into the history of organizing and conducting Russian Arctic expeditions in the early XX th century.....	76
---	----



Обращение к редакторам и издателям российских научных журналов

Уважаемые коллеги!

В это непростое время, когда мы находимся в состоянии неопределенности и ожидания того, как будут развиваться события, мы верим в лучшее и надеемся жить и расти дальше. Мы многому научились за последние десять лет. Призываем всех редакторов и издателей не делать поспешных выводов и, главное, не снижать планку качества своих научных журналов, учиться и учить принятым международным и национальным редакционно-издательским стандартам, следить за применяемыми в мире новыми технологиями и инструментами в нашей отрасли. России нужны свои сильные и авторитетные научные журналы, представляющие результаты важных научных исследований российских ученых мировому сообществу.

Ситуация сложная. Мы сталкиваемся и дальше будем сталкиваться со многими ограничениями в науке и в нашей профессиональной сфере, в том числе с отказом зарубежных коллег от сотрудничества и с нашими журналами, и с нашими авторами. Но такая изоляция не должна нас отбросить назад. Необходимо сохранять высокие требования к отбору статей, пропагандируя значение и принципы рецензирования, важность соблюдения этических и издательских стандартов и норм, поддерживая качество как русского, так и английского языка, выпуск журналов в срок и т. д. Мы надеемся, что случившееся не приведет к снижению требований к поступающим рукописям, а наоборот, позволит сконцентрироваться и сформировать понимание, что российские журналы, несмотря ни на что, должны соответствовать нормам, выработанным годами и десятилетиями на основе лучших международных редакционно-издательских практик, законов авторского права, стандартов профессиональной и общечеловеческой этики.

Российская наука не может развиваться в изоляции от всего мира, иначе все достижения российских ученых будут растворены, потеряны для человечества, не получат ни признания, ни приоритета. Кто-то другой, воспользовавшись российскими разработками, недоступными миру, опубликовав и защитив чужие достижения, станет навсегда их первооткрывателем и владельцем.

В противовес этому российские ученые не могут быть лишены доступа к мировым научным достижениям. Отсутствие информации о зарубежных разработках неизбежно приведет к дублированию, неоправданным затратам на уже проведенные исследования и, как результат, к коллапсу науки в нашей стране.

Российские ученые должны знать о мировых достижениях, и внешний мир должен знать о разработках российских ученых! Мы надеемся, что российское руководство, понимая значимость научной информации, сохранит доступ к зарубежным наукометрическим и реферативным базам данных, а также позволит и дальше продвигать российские журналы в международные информационные ресурсы.

Научное сообщество всегда относилось неоднозначно к принятым в стране в последние годы принципам оценки научной деятельности по показателям цитирования как по данным международных наукометрических баз данных (МНБД) Web of Science / Scopus, так и на основе РИНЦ. Наукометрия как наука нужна и важна. Однако она не может быть основой основ признания научных достижений конкретных ученых и организаций. Гонка за показателями по числу публикаций в МНБД создала нездоровую обстановку в научном сообществе, отразилась на качестве публикаций, вызвала массу этических нарушений. Мы выступаем за то, чтобы наукометрия использовалась по основному своему назначению — для определения актуальности и признания уровня научных исследований и оценки качества научных изданий.

Отказ от оценки эффективности результатов научной деятельности российских ученых по МНБД не значит, что российские журналы и публикации не должны быть видны миру. Scopus и Web of Science являются универсальными поисковыми, реферативными ресурсами, дающими российским ученым информацию о мировых достижениях, одновременно демонстрируя свои. Мы не должны потеряться в этом мире!

Мы также надеемся, что руководство страны поддержит развитие российских научных журналов в условиях, когда они становятся основными источниками научной информации.

Не менее важно обратить внимание на то, что развитие национальных информационных ресурсов является своего рода импортозамещением для российских научных публикаций, и мы надеемся, что на это будут направлены усилия и поддержка государственных органов власти.

Эти и другие темы мы намерены обсудить на нашей ежегодной 10-й Международной научно-практической конференции «Научное издание международного уровня — 2022: от настоящего к будущему», которая пройдет 26–29 апреля 2022 г. в Московском государственном юридическом университете им. О.Е. Кутафина (МГЮА), г. Москва. Приглашаем всех желающих принять участие в этом важном мероприятии.

Сайт конференции: <https://rassep.ru/conf/2022/>.

Ассоциация научных редакторов и издателей всегда готова оказать помощь и поддержку российским научным журналам в решении сложных текущих и стратегических задач, а также принимать участие в определении направлений развития научно-публикационной сферы в России совместно с государственными органами власти.

Сайт АНРИ: <https://rassep.ru> E-mail: office@rasep.ru

С уважением,

Кириллова Ольга Владимировна, президент АНРИ

Лоскутова Татьяна Анатольевна, директор «Академии АНРИ»

Гладун Елена Федоровна, Тюменский государственный университет (ТюмГУ), председатель Этического комитета АНРИ

Елизаров Александр Михайлович, Казанский федеральный университет (КФУ), член Совета АНРИ

Медведева Оксана Олеговна, Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации (РАНХиГС), член Совета АНРИ

Подчиненов Алексей Васильевич, Уральский федеральный университет (УрФУ), член Совета АНРИ

Тихонова Елена Викторовна, Университет МГИМО, руководитель Российского отделения Европейской ассоциации научных редакторов (EASE), член АНРИ

<https://rassep.ru/novosti-i-meropriyatiya/obrashchenie-k-redaktoram-i-izdateliam-rossijskikh-nauchnykh-zhurnalov/>

ОКЕАНОЛОГИЯ
OCEANOLOGY

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-1-8-25>
УДК 504.423



ОБЗОР

REVIEW

**Состояние и перспективы развития системы мониторинга
гидрологических условий акватории
Северного Ледовитого океана**

И.М. Ашик, В.В. Алексеев, Е.В. Блошкина, М.Ю. Кулаков,
М.С. Махотин, А.Д. Тарасенко, К.В. Фильчук*

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

**ashik@aari.nw.ru*

Резюме

В статье сформулированы цели и задачи мониторинга гидрологических условий, излагаются общие соображения о развитии и построении системы мониторинга гидрологических условий в Арктике с учетом использования современных средств и методов океанографических наблюдений и исследований. Показано, что наиболее перспективным представляется использование в системе мониторинга автоматических измерительных комплексов, включающих в себя заякоренные буйковые станции, дрейфующие буи-профилографы. Отмечена особая ценность данных спутниковой океанографии. Вместе с тем сохраняется ценность прибрежных наблюдений, выполняемых на сети станций Росгидромета, а также на базе научных центров, объединенных в Арктическую пространственно-распределенную обсерваторию. Включение в состав этой обсерватории ледостойкой самодвижущейся платформы «Северный полюс», идущей на смену дрейфующим станциям, даст возможность не только наблюдать и измерять основные характеристики водных масс, но и проводить управляемые натурные эксперименты, позволяющие глубже понять разномасштабные физические процессы, протекающие в водах Северного Ледовитого океана. Важным элементом системы мониторинга является усвоение данных, основанное на использовании численных моделей, учитывающих влияние ледяного покрова в системе взаимодействия атмосфера — морской лед — океан.

Ключевые слова: арктические моря, мониторинг, океанография, Северный Ледовитый океан.

Для цитирования: Ашик И.М., Алексеев В.В., Блошкина Е.В., Кулаков М.Ю., Махотин М.С., Тарасенко А.Д., Фильчук К.В. Состояние и перспективы развития системы мониторинга гидрологических условий акватории Северного Ледовитого океана // Проблемы Арктики и Антарктики. 2022. Т. 68. № 1. С. 8–25. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-1-8-25>.

Поступила 18.03.2022**После переработки 03.04.2022****Принята 05.04.2022**

State and development prospects of the hydrological monitoring system of the Arctic Ocean

Igor M. Ashik, Vladislav V. Alekseev, Ekaterina V. Bloshkina,
Mikhail Yu. Kulakov, Mikhail S. Makhotin, Anastasiya D. Tarasenko,
Kirill V. Filchuk*

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

**ashik@aari.nw.ru*

Summary

The article briefly substantiates the need for regular monitoring of the state of the waters of the Russian Arctic Seas and the Arctic Basin of the Arctic Ocean. The goals and objectives of monitoring hydrological conditions are formulated. General ideas about the development and construction of a system for monitoring hydrological conditions in the Arctic are expressed, taking into account the use of modern instruments and methods of oceanographic observations. It is shown that the most promising is the use of autonomous measuring complexes in the monitoring system, including moorings and drifting profiler buoys. The special value of satellite oceanographic data is emphasized. No less important are coastal observations carried out over the network of Roshydromet stations, as well as at research centers united into the Arctic Space-Distributed Observatory. The inclusion into this Observatory of the ice self-propelled platform "North Pole", which will replace the drifting stations, will allow not only observing and measuring the main characteristics of the water masses, but also conducting controlled field experiments that will provide a deeper understanding of different-scale physical processes occurring in the waters of the Arctic Ocean. An important element of the monitoring system is data assimilation based on the use of numerical models that allow for the effect of the ice cover in the atmosphere-sea ice-ocean interaction system.

Keywords: monitoring, oceanography, the Arctic Ocean, the Arctic seas.

For Citation: Ashik I.M., Alekseev V.V., Bloshkina E.V., Kulakov M.Yu., Makhotin M.S., Tarasenko A.D., Filchuk K.V. State and development prospects of the hydrological monitoring system of the Arctic Ocean. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2022, 68 (1): 8–25. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-1-8-25>.

Received 18.03.2022

Revised 03.04.2022

Accepted 05.04.2022

ВВЕДЕНИЕ

Глобальное изменение климата нашей планеты является одной из ключевых проблем, оказывающих существенное влияние практически на все сферы человеческой деятельности. Полярные области Земли и, в частности, Северный Ледовитый океан (СЛО) — важнейшие участники этих изменений. В последние десятилетия в Арктическом регионе фиксируется сокращение площади ледяного покрова, увеличение влияния атлантической воды на Арктический бассейн, интенсификация циклонической деятельности, что ведет к перестройке структуры водной толщи и изменению интенсивности гидрохимических и гидробиологических процессов. Исследования последних лет указывают на существенную роль межгодовых циклов в формировании межгодовой (климатической) изменчивости СЛО, особенно макромасштабной изменчивости его ледового и гидрологического режимов. Вместе с тем возрастает нагрузка на арктическую экосистему, связанная с деятельностью человека. Развитие добычи нефти и газа, рост судоходства могут привести к за-

грязнению окружающей среды и значительным нарушениям экосистемы. Важным остается вопрос сохранения и адаптации коренных народов Крайнего Севера к происходящим изменениям.

В связи с этим на первый план выходит задача организации системы мониторинга природных условий в северной полярной области. В зависимости от области применения и решаемых задач определение понятия «мониторинг» может иметь свою специфику. В широком смысле под мониторингом (от лат. monitor — тот, кто напоминает, предупреждает) понимается слежение за какими-то объектами или явлениями, то есть получение информации о каком-то объекте или ситуации с заданной периодичностью и с помощью одних и тех же индикаторов.

В рамках наук об окружающей среде было дано определение: мониторинг — комплексная система наблюдений за состоянием окружающей среды, оценки и прогноза изменений состояния окружающей среды под воздействием природных и антропогенных факторов. Исходя из определения, система мониторинга должна удовлетворять следующим требованиям: репрезентативность, регулярность, комплексность и системность наблюдений — и обеспечивать потребителя качественной информацией. Результаты такого мониторинга станут основой для совершенствования как технологии наблюдения за состоянием СЛО и его отдельных районов, так и методов прогноза.

В рамках данной статьи рассмотрена концепция мониторинга исключительно гидрологических условий, таких как температура и соленость воды, течения, ветровое волнение и уровень моря.

Измерения различных характеристик океанографического режима, выполняемые в настоящее время, весьма нерегулярны, что обусловлено наличием ледяного покрова, суровыми климатическими условиями, отсутствием развитой инфраструктуры. На основе получаемых данных сложно оценить динамику природных процессов и прогнозировать эволюцию системы в условиях происходящих изменений. В связи с этим для максимально полного и качественного освещения гидрометеорологической обстановки необходимо усовершенствование существующей системы постоянного действующего мониторинга состояния СЛО.

Система мониторинга гидрологического режима акватории арктических морей и Арктического бассейна СЛО строится с учетом государственной политики Российской Федерации в области морской деятельности, национальные интересы которой охватывают экономику и науку, геополитику, военную безопасность, экологию и социальную сферу.

Цель данной работы состоит в формировании общих принципов, общего подхода и конкретных предложений к созданию в перспективе комплексной системы мониторинга состояния арктических морей и Арктического бассейна Северного Ледовитого океана, как объектов, на которых уже в ближайшем будущем развернется интенсивная хозяйственная деятельность, существенно влияющая на социально-экономические условия как Арктического региона, так и других районов Российской Федерации.

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА

Основная цель мониторинга гидрологического режима морских акваторий арктических морей и Арктического бассейна СЛО состоит в обеспечении государственных органов, общественных организаций, научных учреждений, хозяйствующих

субъектов, коммерческих организаций, населения и др. регулярной, качественной, максимально полной информацией о физическом и динамическом состоянии вод Арктического бассейна СЛО и арктических морей, используемой для поддержки морской деятельности в высоких широтах Арктики.

В число задач совершенствования системы мониторинга гидрологического режима морских акваторий арктических морей и Арктического бассейна СЛО входят:

- усовершенствование и обеспечение функционирования сети гидрометеорологических станций в Арктическом регионе;
- разработка оптимальной сети наблюдений, выполняемых в рамках морских экспедиций, и определение точек постановки автоматических измерительных комплексов;
- сбор, хранение, систематизация результатов наблюдений за характеристиками вод Северного Ледовитого океана, включая данные по вертикальному распределению гидрофизических и динамических характеристик водной толщи;
- проведение специальных научных исследований в местах разработки нефтяных и газовых месторождений;
- развитие систем обработки информации на основе гидродинамических и динамико-стохастических методов;
- обеспечение функционирования на территории Арктического региона пунктов сбора и распространения гидрометеорологической информации;
- создание и развитие гидродинамических и прогностических моделей.

Полученные в ходе мониторинга данные могут быть использованы для решения широкого спектра задач, в их числе:

- анализ и оценка состояния вод СЛО;
- развитие научных представлений о функционировании морской природной среды и последующее использование этой информации для объяснения и прогноза наблюдаемых изменений климата Арктики;
- оценка воздействия изменений климата на различные отрасли народного хозяйства и экологическое состояние природной среды в Арктике;
- исследование гидрометеорологических процессов, обеспечение текущей информацией о природных условиях и процессах населения, организаций, фирм, государственных органов в новых условиях хозяйствования в Арктике.

СТРУКТУРА СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА

Береговые наблюдения

Сеть береговых гидрометеорологических станций и обсерваторий

Наблюдения на береговых гидрометеорологических станциях и постах проводятся в оперативных целях: для информирования заинтересованных организаций и населения о состоянии гидрологических элементов в прибрежной зоне моря и устьев рек, контроля качества морских вод по гидрохимическим показателям, использования этой информации в прогностических органах для подготовки гидрологических прогнозов и в научно-методических целях: для составления различного рода режимно-справочных пособий, а также для изучения изменчивости элементов гидрологического и гидрохимического режима, механизмов его формирования и развития, специальных научных исследований.

На береговых станциях, в зависимости от программы, проводятся наблюдения за уровнем моря, температурой и соленостью (плотностью или удельным весом)

воды, волнением и ледяным покровом, гидрохимическими показателями вод, опасными и стихийными явлениями.

Сеть морских береговых и устьевых гидрометеорологических (г/м) пунктов наблюдений подразделяют на основную (включая реперные «вековые» пункты наблюдения) и дополнительную (вспомогательную). Реперная сеть ведет наблюдения для изучения вековой изменчивости гидрологических характеристик морей и морских устьев рек.

К концу 1980-х гг. в арктических морях России была создана обширная сеть станций, осуществлявших наблюдения за колебаниями уровня моря. Водопосты, оборудованные футштоками, а в некоторых случаях и мареографами, создавались не только на морских береговых станциях, располагавшихся как на материковом побережье арктических морей, так и на островах, но и на речных станциях, находившихся в устьях рек, впадающих в арктические моря. В основном плотность сети уровенных наблюдений была вполне удовлетворительной. Расположение и количество уровенных водопостов позволяли решать как сугубо научные, так и чисто практические задачи. В Карском море существовал 31 водопост, 17 из них были оборудованы мареографами; в море Лаптевых находилось 18 водопостов, из них 6 были оснащены самописцами уровня моря; в Восточно-Сибирском море — 10 водопостов, на трех стояли мареографы; в Чукотском море — 5 водопостов, из них 2 были оборудованы самописцами. Расстояние между водопостами, располагавшимися на материковом побережье, в среднем составляло 150–200 км. Исключением являлись восточное побережье Новой Земли, на всем протяжении которого не было ни одной станции, и участок материкового побережья от пролива Дмитрия Лаптева до Колымского залива протяженностью около 700 км, где только в навигационный период действовала единственная станция, располагавшаяся в устье реки Индигирки. Наблюдения за уровнем моря осуществлялись на всех участках трасс, лимитирующих судоходство: на барах сибирских рек, на перекатах и в мелководных проливах. Водопосты располагались во всех портах и портопунктах Северного морского пути. Наблюдения за уровнем моря были организованы в поселках, время от времени подвергавшихся подтоплению. Система контроля за проведением наблюдений позволяла получать достоверную и качественную информацию.

На сегодняшний день состояние сети уровенных наблюдений в арктических морях России представляется крайне неудовлетворительным. Сокращение сети и прекращение наблюдений в 1990-х гг. происходило стихийно, не опиралось на научный анализ и не учитывало требований безопасности населения. Были прекращены наблюдения на станциях, включенных в систему международного обмена данными, прерваны длительные ряды наблюдений. В 2021 г. наблюдения за уровнем моря осуществлялись только на девяти станциях Карского моря и четырех станциях моря Лаптевых. Восточно-Сибирское и Чукотское моря наблюдениями за уровнем моря вообще не освещены.

В современных условиях полное восстановление сети береговых станций и постов не представляется возможным. Необходимы максимальная автоматизация гидрометеорологических наблюдений и оптимизация сети наблюдений. Исходя из целей производства береговых наблюдений, в основу оптимизации сети наблюдений должны быть положены следующие принципы:

- обеспечение репрезентативности для отдельных районов морей, имеющих однородные гидрологические условия;
- поддержание многолетних рядов систематических наблюдений;

– обеспечение данными наблюдений, необходимыми для своевременного предупреждения об угрозе возникновения опасных и стихийных морских гидрологических явлений.

В настоящее время Росгидрометом ведутся работы по программе «Модернизация и развитие гидрометеорологической сети наблюдений за состоянием окружающей среды в Арктической зоне Российской Федерации» Подпрограммы 4 «Организация и обеспечение работ и научных исследований в Арктике и Антарктике» государственной программы «Охрана окружающей среды».

Целью модернизации является создание более качественной и эффективно работающей системы для решения задач наблюдения и прогнозирования, повышения уровня освещенности арктических территорий и акваторий гидрометеорологической информацией, повышения уровня обеспечения безопасности морских операций на трассах Северного морского пути, работ по освоению арктического континентального шельфа.

Научный центр на Шпицбергене

Для усиления российского научного присутствия на архипелаге Шпицберген Правительством РФ в рамках подпрограммы «Освоение и использование Арктики», ФЦП «Мировой океан», III этап (2008–2012 гг.) был утвержден проект «Укрепление российского присутствия на архипелаге Шпицберген», который предусматривал создание Российского научного центра на архипелаге Шпицберген (РНЦШ). Постановлением Правительства РФ от 11 июля 2007 г. № 442 было утверждено Положение о Правительственной комиссии по обеспечению российского присутствия на архипелаге Шпицберген. Координатором всех работ по этому проекту был назначен Росгидромет.

Основной целью РНЦШ является создание и поддержка единой инфраструктуры систем мониторинга природных процессов и состояния природной среды в районе Шпицбергена и на прилегающей акватории СЛО, а также координация научных программ, выполняемых организациями Минприроды, РАН и Росгидромета.



Рис. 1. Лабораторный корпус РНЦШ в Баренцбурге после реконструкции

Fig. 1. The research station laboratory in Barentsburg after reconstruction

Важность получения регулярной информации о состоянии вод к западу от архипелага Шпицберген обуславливается высокой степенью синоптической изменчивости положения и характеристик фронтальной зоны в районе океанологического полигона между теплыми и солеными водами Западно-Шпицбергенского течения и относительно более холодными и пресными водами прибрежных районов. Это обстоятельство дает возможность выполнять исследования сложного комплекса природных процессов и механизмов взаимодействия водных масс различного происхождения. Полученные данные позволяют проводить непрерывную оперативную диагностику состояния вод фьордов арх. Западный Шпицберген и динамических характеристик, изучать причины и последствия наблюдаемых экстремальных изменений морской климатической системы Арктики, а также увеличить заблаговременность прогноза происходящих изменений состояния вод СЛО и его ледяного покрова.

Программа океанографических исследований включает в себя эпизодическое выполнение станций на регулярных разрезах в акваториях фьордов арх. Западный Шпицберген и постановку и подъем притопленных буйковых станций в Ис-фьорде.

В РНЦШ организуется локальный архив первичных и обработанных океанологических данных, которые регулярно передаются через спутниковые системы связи или на машиночитаемых носителях в головную организацию, где эти данные включаются в термохалинную базу данных отдела океанологии ААНИИ, а также в базу данных по морским течениям.

Научно-исследовательский стационар «Ледовая база Мыс Баранова»

Организация научно-исследовательского стационара «Ледовая база Мыс Баранова» (НИС «Мыс Баранова») проведена в рамках Морской доктрины Российской Федерации и является практической реализацией решения Правительства Российской Федерации от 25.04.2008 г. об обеспечении интересов России в высокоширотных и полярных регионах.

Станция расположена вблизи мыса Баранова на острове Большевик архипелага Северная Земля и на прилегающих льдах пролива Шокальского (временные лагеря), имеет координаты: 79°16' с. ш., 101°45' в. д. (рис. 2).

Основные цели научной деятельности, осуществляемой на НИС «Мыс Баранова»:

- продолжение и расширение гидрометеорологического и экологического мониторинга в регионе архипелага Северная Земля;
- проведение комплексных натурных исследований, необходимых для совершенствования методов гидрометеорологического обеспечения хозяйственной деятельности в Арктическом регионе;
- исследование физических процессов, обуславливающих или обусловленных глобальным и региональным изменениями климата.

Реализация указанных выше целей определяет особенности выполняемых на НИС «Мыс Баранова» работ. Последние ориентированы на выявление причин и последствий изменений климата Арктики в контексте комплексного подхода, ориентированного на исследования взаимосвязанных составляющих арктической климатической системы, исследование термохалинной и гидрохимической структуры водных масс в проливе Шокальского и водообмена между Карским и Лаптевых морями.

Программа океанографических исследований включает в себя регулярное выполнение станций на разрезах и постановку и подъем притопленных буйковых станций в проливе Шокальского.



Рис. 2. Географическое положение НИС «Мыс Баранова»

Fig. 2. Location of the “Cape Baranova” station

На базе организуется локальный архив первичных и обработанных океанологических данных, которые регулярно передаются в головную организацию, где эти данные включаются в термохалинную базу данных отдела океанологии АНИИ, а также в базу данных по морским течениям.

Арктическая пространственно-распределенная обсерватория

Координация программ наблюдений в научных центрах на побережье морей Северного Ледовитого океана является основой для создания Арктической пространственно-распределенной обсерватории (АПРО) как структуры, оптимизирующей организацию исследовательских работ на объектах арктической обсервационной инфраструктуры Росгидромета. Это в полной мере соответствует Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации (утверждена Указом Президента Российской Федерации от 1 декабря 2016 г. № 642 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации») по направлению «Связанность территории Российской Федерации за счет создания интеллектуальных транспортных и телекоммуникационных систем, а также занятия и удержания лидерских позиций в создании международных транспортно-логистических систем, освоении и использовании космического и воздушного пространства, Мирового океана, Арктики и Антарктики».

Важным звеном в отечественных исследованиях регионов, большую часть года покрытых льдом, являлась деятельность, связанная с организацией дрейфующих станций и ледовых лагерей. Дрейфующие станции «Северный полюс» (1937, 1950–1991,

2003–2013), Высокоширотная экспедиция «Север» (1937, 1941–1993) обеспечили сбор уникальных данных по батиметрии, температуре, солености, течениям СЛО, в ходе реализации этих масштабных проектов в ААНИИ был наработан колоссальный опыт проведения исследований с базированием на дрейфующем морском льду.

Деградация ледяного покрова, явившаяся следствием климатических изменений, происходивших в последние десятилетия, привела, в том числе, к свертыванию программы работ дрейфующих станций в годовом цикле, оставив возможность организации только сезонных дрейфующих станций в зимне-весенний период. Количество многолетних льдов толщиной 2–3 м, пригодных для организации дрейфующих станций, существенно уменьшилось. Динамические процессы в ледяном покрове стали более интенсивными, значительно увеличилась вероятность разломов ледяных полей. Указанные обстоятельства практически исключают возможность обнаружения надежной ледяной платформы, пригодной для организации полномасштабной станции, рассчитанной на годичную эксплуатацию.

Для продолжения и развития комплексных научных исследований в высоких широтах Северного Ледовитого океана в настоящее время реализуется инновационный проект по созданию плавучей ледостойкой самодвижущейся платформы (ЛСП) с высокой прочностью корпуса, пригодной к использованию в качестве базы дрейфующих научно-исследовательских станций «Северный полюс». ЛСП будет способна функционировать в автономном режиме в течение 2–3 лет, обеспечивая выполнение комплекса исследований, спектр которых может быть значительно расширен относительно стандартного для традиционных дрейфующих станций СП, чьи возможности были ограничены техническими условиями базирования на дрейфующем льду. Наиболее перспективным направлением использования ЛСП для комплексного мониторинга состояния природной среды Арктики представляется ее включение в качестве высокоширотного узла в состав АПРО.

В интересах обеспечения долгосрочного постоянного научного присутствия России в высокоширотной Арктике представляется целесообразной интеграция непрерывно действующих комплексных исследовательских платформ в структуре АПРО. Дальнейшее развитие этой структуры предполагает создание Арктических научно-исследовательских обсерваторий на арктических архипелагах Земля Франца-Иосифа, Новосибирские острова, на островах Диксон и Врангеля, в Певеке, экспедиционных баз на островах Жохова и Средний и включение их в состав распределенной обсерватории. Наряду с проведением комплексных гидрометеорологических исследований, данные объекты должны обеспечивать выполнение специальных научных экспериментов и работ прикладного характера, а также служить основой для проведения ориентированных региональных исследований, направленных на последующее освоение архипелагов. С точки зрения логистики районы географического расположения обсерваторий должны обеспечивать возможности для создания взлетно-посадочных полос и подхода морских транспортных судов и ледоколов.

Эффективное развитие с опорой на узлы АПРО может получить одно из важнейших направлений совершенствования методов сбора оперативных океанографических, метеорологических, ледоисследовательских данных — создание национальной системы автономных дрейфующих измерительных комплексов, выполненных на базе современных технических средств. На базе площадок, входящих в структуру АПРО, могут быть организованы плановые работы по тестовым испытаниям, опыт-

ной эксплуатации и в дальнейшем — развёртыванию отечественной группировки автономных наблюдательных платформ в Арктическом бассейне.

Автоматические измерительные комплексы

В условиях интенсивного развития технических средств все большую популярность в исследованиях Мирового океана обретают автоматические измерительные комплексы. Их основным преимуществом является способность работать автономно в течение длительного срока и при наличии возможности передавать информацию в режиме реального времени.

Дрейфующие буй-профилографы

Наиболее интенсивно развивающимся направлением организации наблюдательных сетей в СЛО является создание и поддержка систем автономных дрейфующих измерительных комплексов, выполненных на базе современных технических средств, позволяющих получать высокодискретные ряды значений гидрофизических характеристик, осуществлять глобальное позиционирование, выполнять операции обмена данными с использованием спутниковых каналов связи. Измерительные комплексы, в которых реализованы описанные выше подходы, созданы в США, Франции, Германии, Великобритании, КНР и других странах. Общая тенденция — интеграция на единой автономной платформе, обеспеченной средствами позиционирования и передачи данных, аппаратно-программных модулей регистрации параметров состояния различных сред.

Примером успешной реализации подобного подхода могут служить исследования, выполняемые в рамках проекта Beaufort Gyre Exploration Project. Специально для задач проекта специалистами Вудсхолльского океанографического института (Woods Hole Oceanographic Institution, США) был разработан научно-технический комплекс, получивший наименование Ice-Tethered Profiler (ITP).

Дрейфующие буйковые станции являются единственным источником поступления оперативной океанографической информации. Основными их недостатками являются возможность применения только в глубоководной части СЛО, в случае использования профилографов, перемещающихся вертикально по линии станции, и невозможность получения информации в заранее определенных районах в связи с постоянным дрейфом станции. Факторами, влияющими на длительность работы автономного дрейфующего измерительного комплекса, являются емкость батарей, обеспечивающих работу прибора, и ограничения, связанные с выбором льдины-носителя (траектория и скорость дрейфа).

Подход к использованию дрейфующих комплексов должен быть гибким, решения о постановке буйв в том или ином месте СЛО должны приниматься на основе анализа фактической и прогностической информации о движениях льда в исследуемом районе, батиметрических условий в районе предполагаемого дрейфа, данных, собранных в результате предыдущих постановок.

Заякоренные буйковые станции

Наряду с дрейфующими буйковыми станциями интенсивное развитие в системе мониторинга текущих изменений состояния арктической климатической системы получают заякоренные притопленные автономные буйковые станции (ПАБС), с помощью которых выполняется сбор информации в фиксированной точке в течение продолжительного периода времени. Перечень параметров, которые возможно регистрировать при помощи заякоренных станций, определяется списком приборов,

способных работать в автономном режиме, а продолжительность наблюдений — емкостью элементов питания. ПАБС на сегодняшний момент являются единственной возможностью получить достоверную оценку параметров динамического состояния водной толщи: скоростей и направлений морских течений, колебаний уровня моря, а также их сезонной и межгодовой изменчивости.

Для мониторинга состояния вод глубинных слоев Арктического бассейна видится перспективным развитие наблюдений при помощи заякоренных буйковых станций, осуществляемых в ключевых районах СЛО, под которыми следует понимать те районы, где процессы трансформации водных масс протекают наиболее интенсивно. В первую очередь это континентальный склон Евразийского бассейна и глубоководные желоба Чукотского моря. Также большой интерес представляют районы трансграничных переносов Арктического бассейна: пролив Фрама, западная часть Баренцева моря, Берингов пролив.

В условиях наличия ледяного покрова вся измеренная информация накапливается в памяти приборов ПАБС. Для ограниченных районов Арктического бассейна, свободных ото льда, можно использовать дополнительный поверхностный буй, укомплектованный средствами спутниковой связи для оперативной передачи информации в центры сбора данных. В силу специфики получения информации с помощью ПАБС, которое происходит в большинстве случаев с существенной задержкой по времени, эти наблюдения хотя и носят вспомогательный характер с точки зрения оперативного мониторинга, но призваны обеспечить понимание базовых физических концепций функционирования климатической системы и особенностей протекания гидрофизических процессов в отдельных районах СЛО.

Экспедиционные исследования

Экспедиционные исследования, в основе которых лежат контактные методы измерений, выполняемых с борта судна на станциях размечаемой на этапе планирования сети полигонов и разрезов, несмотря на развитие автономных платформ и дистанционных методов, остаются важным источником информации об окружающей среде. Основной целью таких исследований является получение данных высокой точности с необходимым пространственным и временным разрешением. При выборе района проведения работ необходимо учитывать такие факторы, как репрезентативность получаемых данных для последующего анализа исследуемых явлений на различных пространственно-временных масштабах, систематичность для оценок происходящих изменений, обусловленных как естественными, так и антропогенными факторами, возможность использовать результаты не только в научных, но и практических целях, комплексность получаемой информации.

Представляется целесообразным возобновление регулярных работ с использованием научно-исследовательских и научно-экспедиционных судов на сети вековых и стандартных разрезов в арктических морях и на акватории СЛО.

Проводимые наблюдения на сети разрезов предоставят возможность отслеживать изменчивость гидрологических и гидрохимических характеристик и использовать полученные данные в гидродинамических и прогностических моделях. Для эффективного решения задач мониторинга необходимо проводить наблюдения на стандартных и вековых разрезах не менее одного раза в месяц при условии отсутствия ледяного покрова и не реже, чем один раз в сезон, при его наличии. Для отслеживания уникальных ситуаций требуется организация дополнительных, более

подробных океанологических съемок. Выполнение работ на разрезах осуществляется с борта судна или с применением вертолета.

При постановке и снятии автоматических измерительных комплексов на акватории СЛО предлагается выполнение разрезов в этих районах не менее чем раз в год, по возможности раз в сезон. Также предлагается создать сеть поперечных разрезов, выполняемых ежегодно, в районе глубоководных котловин (Макарова и Подводников) между хребтами Ломоносова и Менделеева, где наблюдается высокая межгодовая изменчивость расположения так называемого атлантического-тихоокеанского фронта, и стрежня Трансарктического течения.

В рамках системы мониторинга целесообразным представляется возобновление «прыгающих» экспедиций, обеспечивающих информацией об океанографическом режиме практически всего Арктического бассейна за короткий промежуток времени. Эти экспедиции наряду с дрейфующими станциями предоставляют возможность регулярно отслеживать изменения в водной толще океана в те периоды года, когда судовые экспедиции практически не проводятся в связи с тяжелыми ледовыми условиями.

Попутные наблюдения (суда, ледоколы, платформы)

Большинство морских рейсов, проходящих в арктических морях и СЛО, не связаны напрямую с научно-исследовательской деятельностью, а идут по намеченному заранее маршруту, выполняя индивидуальные, как правило, экономические задачи. В связи с этим для проведения эффективного мониторинга состояния окружающей среды предлагается, в зависимости от выполняемых задач, оборудовать суда автоматическими системами сбора и обработки гидрометеорологической информации, которые во многом смогли бы дополнить данные, получаемые научно-исследовательскими экспедициями, а также в полной мере обеспечить потребность в информации по району трассы Северного морского пути. Для оперативного обеспечения такой информацией структур гидрометеорологической службы требуется учесть возможность передачи получаемых данных в режиме реального или близкого к нему времени.

Наблюдения за гидрометеорологическими характеристиками могут быть выполнены при наличии на борту судна или штатного специалиста, или прикомандированного к судну представителя научно-исследовательских учреждений и подразделений Росгидромета.

Попутные наблюдения, не входящие в основные задачи рейса, предполагают незначительные затраты времени на проведение подобных исследований. В связи с этим предлагается использование батитермографического комплекса с набором ХВТ- и ХСТД-зондов, который позволяет проводить измерения в открытых ото льда участках воды во время движения судна. Для исследования состояния поверхностного слоя воды может использоваться проточная система: после выхода судна из порта насос непрерывно подает забортную воду из-под корпуса судна к измерительному комплексу на борту, включающему в себя, как минимум, датчики температуры и солености, а также любые другие по возможности (кислорода, мутности, концентрации хлорофилла и т. д.). Измерительный комплекс проточной системы работает автономно во время научных и логистических рейсов, требует довольно редкого обслуживания, кроме того, возможно настроить передачу данных с судна в основной центр в оперативном режиме. Для регистрации толщины и концентрации ледяного покрова по ходу движения судна возможна установка на борту судна видеокомплекса.

Отдельно стоит отметить систему наблюдений на стационарных платформах, расположенных на внутреннем шельфе арктических морей.

Наблюдаемые гидрометеорологические характеристики и методика наблюдений на стационарных платформах во многом схожи с измерениями, проводимыми на береговых станциях и постах. Однако расположение платформы в открытом море позволяет проводить вертикальное зондирование толщи воды для определения температуры и солёности, а также целого ряда дополнительных характеристик, таких как мутность, концентрация хлорофилла и растворённого кислорода, прозрачность, интенсивность проникновения солнечной радиации и т. д. Подобные наблюдения являются крайне значимыми и должны повсеместно развиваться, т. к. адекватно отражают реальный масштаб явлений (высота волн, колебания уровня и т. д.), происходящих в открытом море, в отличие от данных береговых станций. Это преимущество позволяет использовать данные, получаемые стационарными платформами, для калибровки математических моделей и алгоритмов обработки спутниковой информации.

В отличие от попутных наблюдений, на стационарной платформе для измерения температуры и солёности возможно использование зондов первого класса точности.

Спутниковая океанография

Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) из космоса даёт уникальную возможность получать информацию о состоянии Мирового океана и, в частности, СЛО с высоким пространственным и временным разрешением, что позволяет оценивать и прогнозировать изменения состояния окружающей среды под воздействием природных и антропогенных факторов. Основными преимуществами данных дистанционного зондирования перед контактными методами являются их доступность, оперативность, область покрытия и высокое пространственное и временное разрешение (до нескольких десятков м и нескольких пролётов спутника в день). В Арктическом бассейне сезонные ограничения, связанные с распределением ледяного покрова, представляют трудности для определения параметров поверхностного слоя воды, а частый экраный эффект облачности и продолжительность светового дня — для измерений с использованием каналов видимого диапазона электромагнитного спектра. Тем не менее пассивное ДЗЗ в микроволновом диапазоне, а также радиолокационные исследования позволяют проводить наблюдения и в этих условиях.

По результатам спутниковых измерений в настоящее время можно получать информацию о следующих характеристиках: температура поверхности океана (ТПО) (точность 0,03–0,1 °C в сравнении с данными дрейфующих буев и судовых измерений [1]), солёность (точность около 1 ‰ [2]), уровень океана и геострофические течения (точность 2–3 см), ветровое волнение, данные о динамических структурах, данные об углеродном (нефтяном) загрязнении поверхности океана, содержании примесей (хлорофилл, минеральная взвесь, растворённая органика).

В настоящее время данные измерения обеспечиваются группировкой европейских спутников Sentinel и METOP, американских NOAA и SUOMI-NPP, китайской группировки HaiYang, международных проектов: европейско-американского Jason, китайско-европейского спутника CFOSAT, индийско-французского спутника Saral, американо-японского GCOM и других. Особо стоит отметить группировку российских спутников: Канопус-В-ИК, Метеор-М № 2, Электро-Л, Ресурс-П и новый спутник Арктика, запущенный в 2021 г. В основном эти спутники оснащены

мультиспектральными камерами видимого и ИК диапазона (Метеор М № 2 также оснащен пассивным СВЧ-радиометром). Особенность нового спутника Арктика, а также Электро-Л — это полярная геостационарная орбита, позволяющая проводить непрерывные наблюдения. К сожалению, получение гидрометеорологических параметров с этих спутников ограничено условиями облачности, так как они не оснащены ни СВЧ-радиометром, ни радаром.

С учетом того, что первичная обработка данных дистанционного зондирования осуществляется в специализированных спутниковых центрах (в России — в основном НИЦ Планета), в рамках системы мониторинга предлагается использовать цифровые данные или изображения, имеющиеся в свободном доступе на различных сайтах интернет-сети. При этом спутниковые данные рекомендуется регулярно валидировать с использованием данных контактных измерений, так как алгоритмы для получения «глобальных» коллекций спутниковых данных не всегда используют региональные измерения для проверки точности. В дальнейшем числовые массивы спутниковых данных можно использовать для усвоения в гидродинамических и прогностических моделях и для анализа процессов, происходящих в Арктическом бассейне. Изображения позволяют относительно оперативно отслеживать развитие необычных ситуаций и на основе этого планировать последующие экспедиции и исследования.

УСВОЕНИЕ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ (ПРИЕМ, КОНТРОЛЬ, АРХИВИРОВАНИЕ, СОЗДАНИЕ И ВЕДЕНИЕ БАЗ ДАННЫХ, ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ЕСИМО)

Важным элементом системы мониторинга является механизм сбора, контроля и архивирования данных, поступающих с измерительных платформ. Прием информации необходимо осуществлять в автоматическом режиме с использованием современных каналов связи, соответствующую функциональность должно обеспечить программное обеспечение сервера(ов) системы мониторинга.

Информацию, поступающую со станций гидрометеорологической сети, дрейфующих станций, из гидрометеорологических обсерваторий, мировых центров данных, а также с судов, на которых ведутся попутные наблюдения, планируется усваивать путем обращения к ресурсам Автоматической системы передачи данных (АСПД) по расписанию, соответствующему временному регламенту информационного обмена АСПД. Измерительные платформы, использующие спутниковые каналы связи, такие как дрейфующие буи, автоматические водомерные посты и метеостанции, а также оборудование дистанционного зондирования, размещенное непосредственно на спутниках (радиометры, альтиметры), выгружают данные на станции приема спутниковой информации, с дальнейшей трансляцией в глобальную сеть Internet. Таким образом, при построении программного блока ассимиляции данных необходимо обеспечить возможность обращения к глобальным информационным ресурсам. Результаты исследований, программа которых не предусматривает оперативного обмена информацией (морские экспедиции, долговременные буйковые постановки, авиационные экспедиции с высадкой на лед), предоставляются исполнителями по завершении полевых работ, следовательно, программное обеспечение сервера системы должно выполнять операции загрузки из локальных массивов данных по запросу.

Программное обеспечение (ПО) системы мониторинга предполагается реализовать в рамках клиент-серверной архитектуры. Серверная часть должна включать одну или несколько систем управления базами данных (СУБД), под управлением которых будут развернуты тематические базы данных, структурно оптимизированные

под хранение того или иного вида информации (данные уровенных наблюдений, океанографического профилирования, космические снимки, результаты модельных расчетов и пр.). Кроме того, на сервере должны быть сосредоточены средства автоматической загрузки новой информации, преобразования форматов представления, формального контроля качества, ассимиляции, статистического анализа, визуализации. Серверная часть ПО должна также обеспечивать взаимодействие с внешними информационными системами, такими как ЕСИМО. Клиентская часть ПО будет предоставлять пользовательский интерфейс информационного хранилища системы мониторинга, включая средства конфигурирования запросов к базам, отображения возвращаемых наборов данных и результатов расчетов, операции экспорта, а также инструменты импортирования.

МОДЕЛИРОВАНИЕ В СИСТЕМЕ МОНИТОРИНГА

Одна из основных задач мониторинга — получение климатически значимых интегральных оценок изменчивости параметров исследуемого объекта. Это далеко не простая задача, если данные экспедиционных наблюдений получены неравномерно в пространстве и времени. Особенно велика эта неравномерность, как правило, в Северном Ледовитом океане, что связано с суровостью его ледовых условий. Численные гидродинамические модели позволяют усваивать результаты натурных наблюдений в отдельных точках и получать синхронизированные поля параметров на равномерной сеточной области, что предоставляет возможность в дальнейшем легко рассчитывать корректные интегральные оценки для исследования временной изменчивости и выявления климатических трендов. За последние несколько лет результаты модельных расчетов вошли в целую серию атласов СЛО [3, 4, 5, 6].

Модели могут оказывать значительную помощь в планировании системы мониторинга. По результатам специальных численных экспериментов можно определить на исследуемой акватории районы, где формируется наиболее отчетливый отклик на возмущения, и/или участки границ, через которые могут проникать наиболее значимые для состояния океана аномалии (например, [7]). Такая информация может быть очень полезной при планировании экспедиционных исследований и выборе мест для установки автоматических измерительных комплексов наблюдений.

Велико значение мониторинга для организации оперативного обеспечения хозяйственной деятельности в СЛО. Именно на основании моделей созданы технологии краткосрочных прогнозов уровня моря, течений и дрейфа льда и айсбергов, переноса и трансформации загрязнений [8]. Эти технологии применяются для обеспечения прогнозами наиболее значимых проектов в Арктике: МЛСП «Приразломная», Ямал СПГ (Сабетта), «Сахалин-1» и др.

Перечисленные направления применения численного моделирования в системе мониторинга не исчерпывают всех возможностей современных моделей, но обязательным условием их применимости является высокое качество воспроизведения моделью исследуемых процессов. Для этого необходимо тщательно верифицировать и калибровать модель путем многочисленных тестовых расчетов и сопоставления результатов с доступными натурными данными.

Ввиду отсутствия продолжительных инструментальных измерений волнения в арктических морях России, мониторинг ветрового волнения основывается на результатах модельных расчетов. Для того чтобы результаты математического моделирования можно было положить в основу системы мониторинга СЛО, модели

должны регулярно проходить верификацию с помощью доступных инструментальных измерений, как в интересующем нас регионе, так и в других регионах, где эти данные существуют. В настоящее время расчет ветроволновых условий осуществляется ежедневным использованием авторской спектрально-параметрической модели AARI-PD2 [9, 10, 11], разработанной в ЛО ГОИН и модифицированной в ААНИИ, а также с помощью дискретно-спектральных моделей 3-го поколения WaveWatch III, SWAN, WAM [12]. Основными исходными данными моделей являются поля атмосферного давления на уровне моря (или поля составляющих скорости ветра на высоте 10 м), данные о положении кромки льда, а также батиметрические данные в узлах расчетной сетки. Исходные данные оперативно поступают из метеорологического центра Брекнелл (Великобритания, EGRR) в ААНИИ в центр коммутации сообщений (ЦКС UNIMAS) автоматизированной системы передачи данных (АСПД) Росгидромета (формат данных GRIB1). Положение кромки льда при расчетах задается по ежедневным спутниковым многоканальным микроволновым данным (SSM/I) и уточняется по данным реанализа сплоченности льда ААНИИ.

Особенностью арктического региона является практическое отсутствие регулярных контактных (буйковых) измерений параметров ветрового волнения и перспективы использования данных спутниковых альтиметров, как для задач непосредственного мониторинга, так и для верификации средств и технологий модельного ветроволнового мониторинга.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С НАЦИОНАЛЬНЫМИ И ВЕДОМСТВЕННЫМИ ЦЕНТРАМИ СБОРА ИНФОРМАЦИИ ПО СЛО

Взаимодействие с другими центрами сбора информации об океанографическом режиме СЛО обуславливает повышение эффективности функционирования системы мониторинга.

Совместимость данных, получаемых в результате различных наблюдений в рамках системы мониторинга, обеспечивается использованием единых Руководящих документов и Наставлений, единых форматов данных, совместимых с информационными системами ЕСИМО, АКМОН, «Север», «Информационной системой ВМО» и др.

В качестве дополнительного источника данных предполагается использовать информацию о термохалинных и гидрохимических характеристиках, доступную для свободного пользования в сети Internet. В случае необходимости возможно приобретение представляющих интерес характеристик на коммерческой основе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализация предлагаемой системы мониторинга гидрологического режима (рис. 3) должна обеспечить всех заинтересованных пользователей достаточно полной, регулярной и качественной информацией о гидрологических условиях арктических морей и Арктического бассейна СЛО. Следующими шагами по построению такой системы должна стать разработка Программы и Плана реализации системы мониторинга, включающих в себя проведение НИР, направленных на научное обоснование принятия решений по реализации системы, разработке новых современных методов наблюдений, сбора, обработки и анализа данных, и ОКР, направленных на развитие отечественного морского приборостроения, создание инструментов, приборов, оборудования и морской техники, предназначенных для исследований океана.

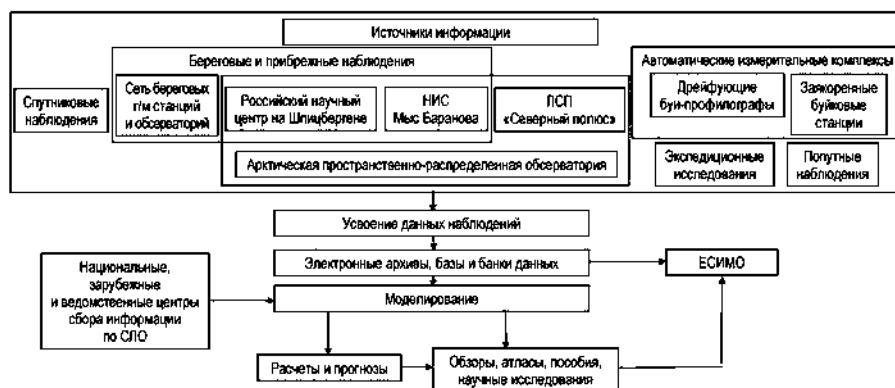


Рис. 3. Схема системы мониторинга ААНИИ гидрологических условий Северного Ледовитого океана

Fig. 3. Scheme of the AARI monitoring system for the hydrological conditions of the Arctic Ocean

Конфликт интересов. Авторы статьи не имеют конфликта интересов.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках Плана научно-исследовательских и технологических работ НИУ Росгидромета в 2020–2021 гг. по теме 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».

Competing interests. The authors have no conflicts of interests.

Funding. The study was carried out within the framework of the research program of Roshydromet in 2020–2021, topic 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”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Q.eu/documents/QUID/CMEMS-SI-QUID-011-016.pdf (дата посещения 06.04.2022).
2. SMOS ARCTIC sea surface salinity fields available at CATDS. URL: https://www.ifremer.fr/catds_fre/News/SMOS-ARCTIC-sea-surface-salinity-fields-available-at-CATDS (дата посещения 06.04.2022).
3. Атлас гидрометеорологических и ледовых условий морей Российской Арктики / Под редакцией В.А. Павлова и др. М.: ЗАО «Издательство “Нефтяное хозяйство”», 2015. 128 с.
4. Национальный Атлас Арктики: (Электронная версия). М.: АО «Роскартография», 2017. 700 с.
5. Aleksandrov E.I. et al. Ecosystems of the Bering Strait and Factors of Anthropogenic Impact. M.: WWF-Russia, 2019. 282 p.
6. Моря российской Арктики в современных климатических условиях. СПб: ААНИИ, 2021. 360 с.
7. Кулаков М.Ю., Макинас А.П., Шутилин С.В. Модельные оценки чувствительности ледяного покрова Северного Ледовитого океана к изменениям форсингов // Проблемы Арктики и Антарктики. 2012. № 3 (93). С. 66–74.
8. Миронов Е.У., Аиши И.М., Дымов В.И., Кулаков М.Ю., Клячкин С.В. Модели и методы расчета и прогноза ледовых и океанографических условий в арктических морях // Проблемы Арктики и Антарктики. 2010. № 2 (85). С. 16–28.

9. Лавренев И.В. Математическое моделирование ветрового волнения в пространственно-неоднородном океане. СПб.: Гидрометеониздат, 1998. 500 с.
10. Дымов В.И., Пасечник Т.А., Лавренев И.В., Давидан И.Н., Абузаров З.К. Сопоставление результатов расчетов современных моделей ветрового волнения с данными натурных измерений // *Метеорология и гидрология*. 2004. № 7. С. 87–94.
11. Давидан И.Н., Давидан Г.И., Дымов В.И., Пасечник Т.А. Модифицированная версия спектрально-параметрической модели ветрового волнения и результаты ее верификации // *Изв. РГО*. 2010. Т. 142. Вып. 2. С. 31–39.
12. Нестеров Е.С., Абузаров З.К., Григорьева Г.А., Давидан И.Н., Дымов В.И., Пасечник Т.А. Оценка точности расчета смешанного волнения в океане по современным численным моделям // *Метеорология и гидрология*. 2011. № 10. С. 44–52.

REFERENCES

1. Quality information document for Arctic Sea and Ice surface temperature product SEAIce_ARC_PHY_CLIMATE_L4_MY_011_016. Available at: <https://catalogue.marine.copernicus.eu/documents/QUID/CMEMS-SI-QUID-011-016.pdf> (accessed 06.04.2022).
2. SMOS ARCTIC sea surface salinity fields available at CATDS. Available at: https://www.ifremer.fr/catds_fre/News/SMOS-ARCTIC-sea-surface-salinity-fields-available-at-CATDS (accessed 06.04.2022).
3. *Atlas gidrometeorologicheskikh i ledovykh uslovii morei Rossiiskoi Arktiki*. Atlas of hydrometeorological and ice conditions of the seas of the Russian Arctic. V.A. Pavlov et al. ed. Moscow: ZAO Izdatel'stvo "Neftianoe khoziaistvo", 2015: 128 p. [In Russian].
4. *Natsional'nyi Atlas Arktiki (elektronnaya versiya)*. National Atlas of the Arctic (electronic version). Moscow: AO "Roskartografiya", 2017: 700 p. [In Russian].
5. *Aleksandrov E.I. et al. Ecosystems of the Bering Strait and Factors of Anthropogenic Impact*. Moscow: WWF-Russia, 2019: 282 p.
6. *Moria rossiiskoi Arktiki v sovremennykh klimaticheskikh usloviyakh*. The seas of the Russian Arctic in modern climatic conditions. St. Petersburg: AARI, 2021: 360 p. [In Russian].
7. Kulakov M.Iu., Makshtas A.P., Shutilin S.V. Model estimates of the sensitivity of the ice cover of the Arctic Ocean to changes in forcings. *Problemy Arktiki i Antarkтики*. Arctic and Antarctic Research. 2012, 3 (93): 66–74. [In Russian].
8. Mironov E.U., Ashik I.M., Dymov V.I., Kulakov M.Iu., Kliachkin S.V. Models and methods for calculating and predicting ice and oceanographic conditions in the Arctic seas. *Problemy Arktiki i Antarkтики*. Arctic and Antarctic Research, 2 (85), 2010: 16–28. [In Russian].
9. Lavrenov I.V. *Matematicheskoe modelirovanie vetrovogo volneniia v prostranstvenno-neodnorodnom okeane*. Mathematical modeling of wind waves in a spatially inhomogeneous ocean. St. Petersburg: Hydrometeoizdat, 1998: 500 p.
10. Dymov V.I., Pasechnik T.A., Lavrenov I.V., Davidan I.N., Abuzarov Z.K. Comparison of the results of calculations of modern models of wind waves with the data of field measurements. *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and hydrology. 2004, 7: 87–94. [In Russian].
11. Davidan I.N., Davidan G.I., Dymov V.I., Pasechnik T.A. Modified version of the spectral-parametric model of wind waves and the results of its verification. *Izvestiya RGO*. News of the Russian Geographical Society. 2010, 142 (2): 31–39. [In Russian].
12. Nesterov E.S., Abuzarov Z.K., Grigor'eva G.A., Davidan I.N., Dymov V.I., Pasechnik T.A. Assessment of the accuracy of calculating mixed waves in the ocean using modern numerical models. *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and hydrology. 2011, 10: 44–52. [In Russian].

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-1-26-47>
УДК 504.4:551



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

**Волновые процессы в дрейфующем льду
Северного Ледовитого океана в экспедиции MOSAiC.
Зимний период**

В.Н. Смирнов, М.С. Знаменский, И.Б. Шейкин*

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

**smirnov@aari.ru*

Резюме

Одной из основных научных и прикладных проблем в Арктике являются исследования физико-механических процессов в системе атмосфера — лед — океан. С этой целью решаются теоретические и экспериментальные задачи. В настоящей работе использовался метод мониторинга состояния дрейфующего льда с помощью автономных сейсмических станций в международной экспедиции MOSAiC в 2019–2020 гг. Метод дистанционной регистрации ледовой информации с дискретностью 100 Гц позволил получить данные о процессах сжатия и торошения льдов различного временного и пространственного масштаба. В работе представлены первые результаты о развитии физико-механических процессов в ледяном покрове при воздействии ветра, океанических гравитационных волн, явлениях сжатия и торошения при крупномасштабных деформациях в дрейфующем льду. Полученные в работе амплитудно-частотные спектры поверхностных гравитационных волн являются основанием относить описанные явления к волнам зыби и инфрагравитационным волнам, возникающим в штормовых районах океанов. Получены новые данные о низкочастотных горизонтально-поляризованных волнах, обусловленных сжатием льдов и подвижками по разрывам в сплоченном ледяном покрове. Рассмотрены возможности использования инструментального мониторинга возникновения и развития приливного сжатия и торошения в дрейфующих льдах Северного Ледовитого океана. Полученные результаты могут быть использованы для разработки методов прогнозирования состояния льдов в режиме реального времени как в инженерных задачах, так и для совершенствования моделей прогноза погоды и климата.

Ключевые слова: колебания и волны, мониторинг состояния льда, разломы льда, сжатие и торошение.

Для цитирования: Смирнов В.Н., Знаменский М.С., Шейкин И.Б. Волновые процессы в дрейфующем льду Северного Ледовитого океана в экспедиции MOSAiC. Зимний период // Проблемы Арктики и Антарктики. 2022. Т. 68. № 1. С. 26–47. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-1-26-47>.

Поступила 28.09.2021

После переработки 13.01.2022

Принята 15.01.2022

Wave processes in the drifting ice of the Arctic Ocean in the MOSAiC expedition. Winter period

Victor N. Smirnov*, Maxim S. Znamensky, Igor B. Sheykin

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

*smirnov@aari.ru

Summary

One of the main directions of theoretical and applied research in the Arctic is the study of physical and mechanical processes in the atmosphere — ice — ocean system. For this purpose, theoretical and experimental problems are solved. The paper employs the method of monitoring the state of drifting ice by means of autonomous seismic stations in the MOSAiC international expedition in 2019–2020. The method of remote registration of ice information with a discreteness of 100 Hz made it possible to obtain data on the processes of compression and crushing of ice of various temporal and spatial scales. The paper presents early findings on the development of physico-mechanical processes in the ice cover under the influence of wind, oceanic gravitational waves, compression and crushing phenomena during large-scale deformations in drifting ice. The amplitude-frequency spectra of surface gravitational waves obtained in this work provide sufficient reason for attributing the phenomena described to swell waves and infra-gravity waves that occur in the stormy areas of the oceans. New data have been obtained on low-frequency horizontally polarized waves caused by the compression of ice and movements along breaks in the cohesive ice cover. The article considers the possibilities of using instrumental monitoring of the occurrence and development of tidal compression and crushing in the drifting ice of the Arctic Ocean. The results obtained can be used to develop methods for predicting the state of ice in real time both in engineering tasks and for improving weather and climate forecasting models.

Keywords: compression and torsion, ice condition monitoring, ice fractures, vibrations and waves.

For Citation: Smirnov V.N., Znamensky M.S., Sheykin I.B. Wave processes in the drifting ice of the Arctic Ocean in the MOSAiC expedition. Winter period. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2022, 68 (1): 26–47. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-1-26-47>.

Received 28.09.2021

Revised 13.01.2022

Accepted 15.01.2022

ВВЕДЕНИЕ

Временные и пространственные масштабы механики деформирования ледяного покрова Северного Ледовитого океана (СЛО) и образование упорядоченных ледовых структур обусловлены развитием целого комплекса динамических процессов в системе атмосфера — лед — океан. Выявление физических связей крупномасштабных процессов в такой геофизической системе необходимо для совершенствования методов прогнозирования сжатия и торошения льдов, образования локальных и протяженных разломов и разводов в ледяном покрове. Результаты инструментальных исследований деформирования и разрушения арктических льдов представлены во многих работах. Подвижки и приливные деформации дрейфующего льда исследовались на российских дрейфующих станциях «Северный полюс» [1]. Механические напряжения в морском льду могут быть показателем приливных явлений в океане [2]. Крупномасштабная механика динамического взаимодействия морских льдов отражена в работах при пространственной расстановке приборов на льду [3, 4]. Пространственные и временные характеристики относительного деформирования дрейфующих льдов рассмотрены в [5]. Перестройка структурных связей в ледяном покрове разного масштаба сопро-

вождается колебаниями и волнами на поверхности океана [6]. Спутниковое изображение блоковой ромбовидной сетки каналов и разводий, а также характер подвижек на большой площади свидетельствуют о проявлении сдвиговых форм разрушения и торошения льда различного пространственно-временного масштаба.

Анализ прочности ледяной пластины и дисперсия изгибно-гравитационных волн отражены в работах [3, 4, 7]. При образовании трещин и разрушении ледяного поля образуется широкий спектр объемных и изгибных колебаний. На записях сейсмометров преобладают вертикальные колебания частиц льда, асимметричные относительно срединной плоскости ледяной пластины. Если энергии в источнике достаточно, чтобы возбудить и гравитационные колебания льда, т. е. колебания совместно с водой, то в результате образуются изгибно-гравитационные волны.

Волны малой амплитуды с периодами 30 с и более могут использоваться для измерения толщины ледяного покрова путем определения времени их прохождения между точками измерений. Океанские волны с такими периодами названы инфра-гравитационными волнами, которые генерируются при нелинейном взаимодействии штормовых волн зыби с морским дном шельфовых районов океана [8].

В работах [9, 10] показано, что при сдвиговых напряжениях в ледяном покрове возникают упругие низкочастотные волны. Длительность и интенсивность подвижки с трением по готовому разрыву формируют структуру излучаемых упругих волн. При каждом сдвиге в сплоченном ледяном массиве происходит своеобразный сдвиговый удар по всей длине разрыва. Характер взаимодействия в системе лед — лед определяет спектральный состав возникающих горизонтально-поляризованных колебаний.

Масштабная фрагментация структуры льдов обусловлена циклическими процессами во льду, которые в силу их регулярности поддерживают постоянные состояния разрушения по различным пространственным и временным масштабам. Одним из основных факторов, через которые эти процессы реализуются, являются периодические горизонтальные подвижки льда, особенно проявляющиеся через разномасштабные деформационные процессы и волны в ледяном покрове. С помощью инструментальных наблюдений на дрейфующих станциях «Северный полюс» выявлены процессы периодических горизонтальных смещений в сплоченном ледяном массиве, которые можно представить как крупномасштабные релаксационные автоколебания [10]. Процессы могут длиться несколько часов и состоять из периодических сбросов напряжений с интервалами от единиц до десятков минут.

Одним из сложных вопросов полярной океанологии является создание физико-механической модели поведения морского льда при приливных или инерционных явлениях в СЛО. В связи с возникновением эффектов приливного сжатия и генерации упругих и гравитационных волн сейсмометрические измерения на морском льду представляют наиболее точное средство исследования спектра таких волн [2, 3, 11].

Настоящая работа является продолжением научных исследований динамики ледяного покрова и посвящена описанию методики наблюдений и первым результатам по волновым и колебательным явлениям на поверхности СЛО в зимний период экспедиции MOSAiC в 2019–2020 гг.

МЕТОДЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Для проведения мониторинга динамического состояния дрейфующего ледяного покрова использовался сейсмометрический метод. Для сбора и экспресс-анализа данных использовалась система мониторинга динамики дрейфующего морского

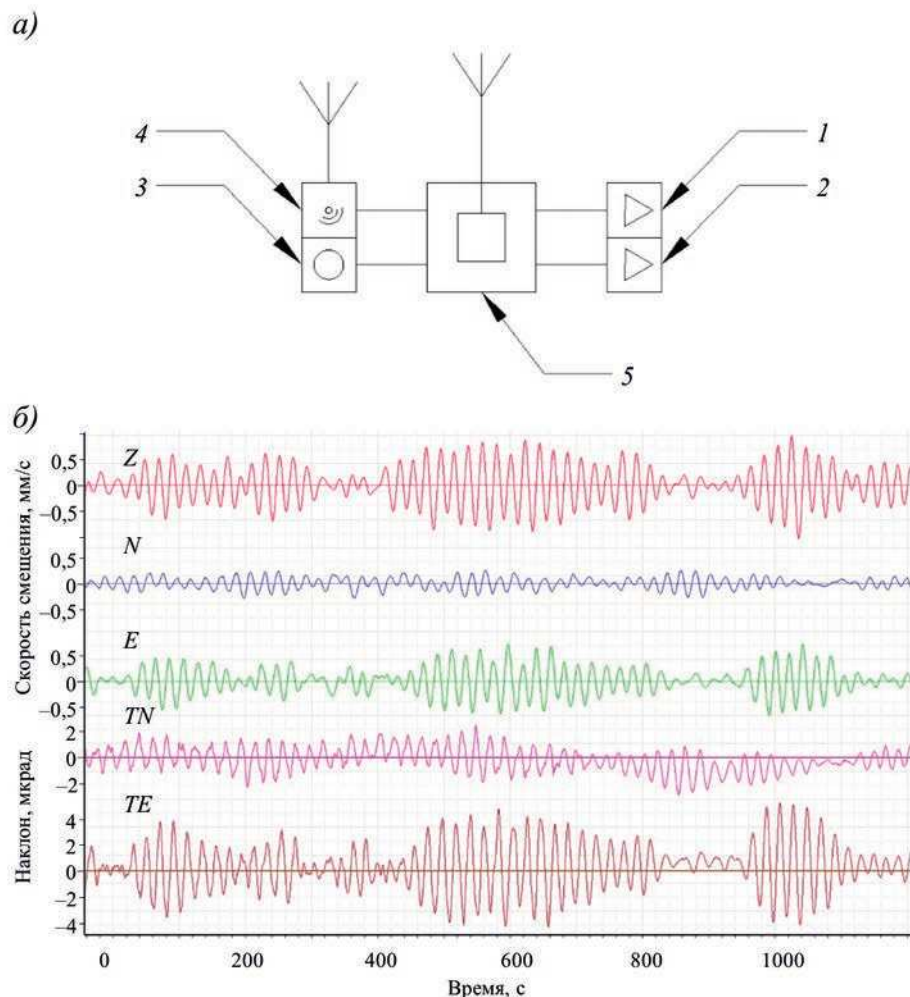


Рис. 1. Блок-схема полевой сейсмостанции (а) и пример записи колебаний дрейфующего ледяного покрова (б).

1 — сейсмометр СМЕ-4311, 2 — наклономер ИН-ДЗ-360, 3 — аккумуляторная батарея, 4 — приемник GPS-сигнала, 5 — модуль оцифровки данных с радиоканалом; Z, N, E — записи от вертикального и горизонтальных компонент сейсмометра; TN, TE — записи от двух компонент наклономера. Станция Бета, 01.11.2019

Fig. 1. Block diagram of a field seismic station (a) and a typical example of recording vibrations of a drifting ice sheet (b).

1 — seismometer СМЕ-4311, 2 — inclinometer ИН-ДЗ-360, 3 — battery, 4 — GPS signal receiver, 5 — data digitization module with radio channel; Z, N, E — records from the vertical and horizontal components of the seismometer; TN, TE is a record from the two components of the tilt meter. Station Beta, 01.11.2019

льда, созданная в ААНИИ [11]. Для регистрации колебаний и волн в системе лед — вода применялись широкополосные трехкомпонентные электронно-молекулярные сейсмометры СМЕ4311 с коэффициентом преобразования 4000 В/м/с. Амплитудно-частотная характеристика сейсмометра СМЕ4311 столообразная в частотном диапазоне 0,0167–50 Гц и с более низкой границей до 0,01 Гц.

Для регистрации наклонов льда в двух горизонтальных координатах использовались наклонометры типа ИН-Д3а-360. Наклономер на выходе имеет сумму показаний в виде ускорений и наклонов. Диапазон измерения наклонов: ± 360 угловых секунд или ± 1746 мкрад; диапазон измерения ускорений: $1,75 \cdot 10^{-2}$ м/с² или 17,5 мм/с² при динамическом диапазоне 60 дБ.

Сейсмометры и наклонометры устанавливались на специально изготовленные постаменты, вмороженные в лед на глубину до 30 см. В самом общем виде для любой пространственной расстановки приборов и безотносительно к направлению распространения волны методика расчета фазовой скорости и азимута определяется по соответствующим методикам [3, 11].

Первичными звеньями системы мониторинга состояния льда являются полевые сейсмические станции сбора данных от присоединенных датчиков — сейсмометров и наклонометров (рис. 1).

Полевые станции сбора данных производят операцию оцифровки данных от датчиков с заданной частотой. Оцифровка данных осуществлялась с помощью высокоточных 24-битных АЦП типа сигма-дельта в составе системы мониторинга на частоте дискретизации 100 Гц для всех каналов. При этом сбор всех каналов данных на станциях синхронизирован с помощью часов глобальной системы позиционирования. Данные сохраняются в локальном хранилище, а также по радиоканалу передаются на сервер сбора данных базовой станции в режиме реального времени. Каждая полевая станция сбора данных оснащена геопозиционным модулем, который собирает и передает координаты станции через радиоканал. Электропитание всех полевых приборов осуществлялось от аккумуляторных батарей.

Все данные передавались на базовую станцию судна «Поларштерн», состоящую из приемника/передатчика основного радиоканала, вторичного радиоканала для локальной передачи данных между выносным передатчиком основного радиоканала и сервером сбора данных. Сервер сбора данных принимал по радиоканалу данные от полевых станций в режиме реального времени и сохранял их в архиве. Также сервер сбора данных осуществлял вывод получаемых данных на графический дисплей в виде волновых профилей, принимаемых от всех полевых станций с возможностью обработки и выделения интересующей информации.

Применяемая в экспедиции MOSAiC измерительная система с пространственной расстановкой приборов на льду обладает большой емкостью энергонезависимой памяти, модулем GPS для синхронизации сбора сигналов, высококачественными АЦП для оцифровки сигналов, возможностью мониторинга сигналов в режиме реального времени на базовой станции.

На рис. 1б показана типичная запись колебаний в дрейфующем ледяном покрове во время прохождения волн океанской зыби. Зарегистрированы характеристики скорости смещения и записи от наклонометров. Все данные с трех сейсмостанций являются основными для исследования кинематических и динамических свойств дрейфующего льда. В данной статье для выявления локальных особенностей динамики льда использованы первые результаты только одной станции. В дальнейшем планируется каждое событие описать с привлечением данных пространственной расстановки сейсмостанций, использованием синоптической ситуации, описанием относительных деформаций льда и процессов трещинообразования в ледяном покрове.

Круглосуточный мониторинг состояния дрейфующего ледяного покрова сопровождался визуальным осмотром ледяного поля лагеря станции, обнаружением, по возможности, сквозных трещин, подвижек и торошений. Особое внимание уделялось первичным сигналам, возникающим перед сжатием и торошением льдов.

В первичную обработку исходных данных входили следующие этапы:

- построение временных ходов скорости смещений в колебаниях и волнах;
- построение спектров колебательных и волновых процессов методом БПФ;
- построение спектров колебательных и волновых процессов методами непрерывного вейвлет-преобразования;
- построение синхронных с динамикой льда метеорологических характеристик.

Для оценки интенсивности временных рядов вертикальных и горизонтальных колебаний в сравнительно узкополосной части исследовался спектр БПФ в линейном масштабе амплитуды, который дает истинное представление измеренной амплитуды волновых процессов. Тенденция изменчивости волновых процессов определялась также методом непрерывного вейвлет-преобразования, который позволяет построить спектрограмму волнового процесса и получить картину изменения интенсивности различных участков в широком диапазоне частот во времени.

Построение временных рядов производилось с привлечением первичных данных экспедиции и хранящихся в архиве в формате MINISEED. Данные в этом формате хранятся в синхронизированном с UTC времени. Временные профили визуализировались при помощи программы, написанной на языке PYTHON с привлечением ряда библиотек, таких как NUMPY, SCIPY, OBSPY, MATPLOTLIB.

Таким образом, при обработке исходных цифровых материалов наблюдений можно выделять особенности спектров при сопоставлении с метеорологическими ходами ветра, атмосферного давления и температуры воздуха. Построение синхронных метеорологических ходов проводилось на основе стандартных данных метеостанции судна «Полярштерн». Все приведенные выше данные могут быть скомпонованы на единой диаграмме для поиска соответствий и взаимных влияний рассматриваемых физических параметров друг на друга. На временной диаграмме используется единая шкала времени в формате UTC, т. е. все данные измерений являются синхронизированными по времени.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В экспедиции MOSAiC за все время наблюдений методом сейсмометрии было зарегистрировано несколько ледовых событий, отразивших интенсивную динамику дрейфующего льда. Механика разрушения льда как на уровне локальных сквозных трещин, так и протяженных сдвиговых торошений и образования разветвлений может решаться с помощью соответствующих методик определения характеристик упругих и гравитационных волн. На данном этапе мы представляем картину динамики льда с проявлением процессов в системе воздух — лед — вода в первые месяцы экспедиции MOSAiC. Рассмотрим наиболее выраженные в физико-механическом отношении ледовые события из зимнего периода экспедиции: *ноябрь 2019 — март 2020 гг.*

Событие 24 октября — 5 ноября 2019 г. (рис. 2). Первые результаты по динамическим процессам в системе лед — вода были получены в массиве сплоченных однолетних и двухлетних дрейфующих ледяных полей толщиной до 1,5 м.

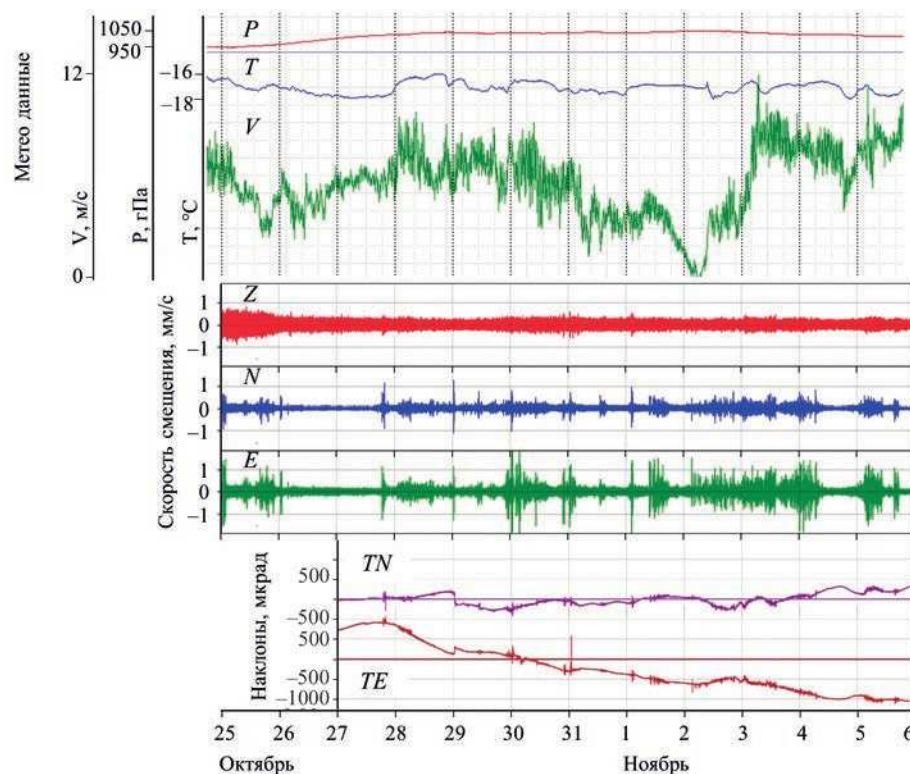


Рис. 2. Временной ход вертикальных и горизонтальных колебаний дрейфующего льда и метеопараметров за период 24.10–05.11.2019.

Z, N, E — записи сейсмометра с вертикальным (красные) и горизонтальными (синие и зеленые) колебаниями льда; *TN, TE* — запись от двух компонент наклономера

Fig. 2. Time course of vertical and horizontal fluctuations of drifting ice and meteorological parameters for the period 24.10–05.11.2019

Z, N, E are records of the seismometer with vertical (red) and horizontal (blue, and green) ice fluctuations, respectively; *TN, TE* is a record from the two components of the tilt meter

На рис. 2 представлен временной ход изменчивости вертикальных и горизонтальных колебаний льда и метеопараметров в начальный период экспедиции. При сравнительно слабых перепадах скорости ветра не отмечается заметной изменчивости амплитуды вертикальных колебаний льда, т. е. визуально на графиках корреляция практически не заметна. В то же время и горизонтальные составляющие колебаний, имея интенсивные сигналы с заметной периодичностью появления, слабо связаны со скоростью ветра.

Наклонометры в рассматриваемом событии имели записи неустойчивого тренда и в отдельные моменты регистрировали горизонтальные импульсы ускорения синхронно с записями сейсмометров. Данные от наклономеров в настоящей работе используются только как вспомогательная информация при рассмотрении влияния на ледяной покров внутренних волн и приливных или инерционных колебаний в океане.

Из графиков рис. 2 видно, что фон вертикальных колебаний льда в течение 20 дней сохранялся постоянным. Эти колебания преимущественно с периодом до

35 с рассматриваются как долгопериодные волновые движения, которые можно отнести к типу инфрагравитационных волн в океане [8, 9]. В дальнейшем подобному явлению будет уделено особое внимание как отклику арктического льда на мощные штормовые процессы в Атлантическом океане при движении циклонов в северо-восточном направлении.

Кроме вертикальных колебаний амплитудный спектр имеет пики горизонтальных сигналов на частотах до 0,01 Гц. Возникновение таких сигналов не связано по времени с вертикальными колебаниями и с метеопараметрами. Природу возникновения горизонтальных колебаний в дрейфующем льду можно рассматривать в связи с образованием протяженных трещин и последующих сдвигов в сплоченном ледяном покрове. Подобные горизонтальные сигналы могут быть комбинацией как локальных подвижек льда, так и масштабных приливных явлений типа баротропных приливных течений и внутренних волн. На данном этапе можно предполагать, что отмеченные на графиках горизонтальные колебательные процессы обусловлены крупномасштабными движениями ледяного покрова, в том числе инерционными колебаниями в океане.

Событие 9–21 ноября 2019 г. На рис. 3 представлены записи вертикальных и горизонтальных колебаний в ледяном покрове в период 9–21 ноября 2019 г. Особенно отмечается изменчивость амплитудного спектра колебаний ледяного покрова за период 11–13 ноября. В спектральном составе колебаний проявляется увеличение частоты в отдельные этапы времени. Это говорит о том, что в эти моменты возникали разрушения льда, сопровождавшиеся излучением изгибно-гравитационных волн на частотах 0,1–0,5 Гц (рис. 3б и 3в).

Следует отметить, что вертикальные колебания с периодом 20–25 с возникали при сравнительно малой скорости ветра 6 м/с. Очевидно, что такая информация указывает на проявление океанских поверхностных волн с периодом до 25 с от далекого циклона и шторма на открытой воде. Из результатов спектрального анализа следует, что за время движения циклона по направлению к дрейфующей станции с 10 по 13 ноября период волны уменьшился на 7,7 с. Согласно графикам рис. 3б с 10 по 13 ноября частота вертикальных колебаний увеличилась с 0,036 Гц до 0,050 Гц, т. е. за 72 ч период колебаний уменьшился с 27,7 до 20 с. Полученная информация может служить для разработки метода определения эпицентра зарождения и распространения гравитационных волн. Важно отметить, что 11 ноября в период 12–18 ч в спектре регистрировался цуг волн, обусловленный воздействием ветра.

При рассмотрении аналогичной картины в период 14–15 ноября получены следующие данные: изменение частоты в пределах 0,042–0,052 Гц, т. е. при почти полном штиле ветра период колебаний за время наблюдений 42 ч уменьшился с 24,8 до 19,2 с.

Особенно интенсивные колебания ледяного покрова отмечались 16 ноября, когда сигналы от всех сейсмометров на ледовом полигоне «зашкаливали» (рис. 3а). При скорости ветра 24 м/с значение скорости вертикальных смещений во льду могло превышать десятки мм/с. Очевидно, что не все вертикальные колебания были вызваны усилением скорости ветра. Например, увеличение вертикальной компоненты 14–15 ноября не связано с ветром. Как покажут данные событий в следующих месяцах мониторинга, колебания в этот период возбуждались волнами зыби от далекого шторма.

События с частотными спектрами колебаний обусловлены как генерацией в ледяном покрове океанских гравитационных волн, так и возникновением локальной механики

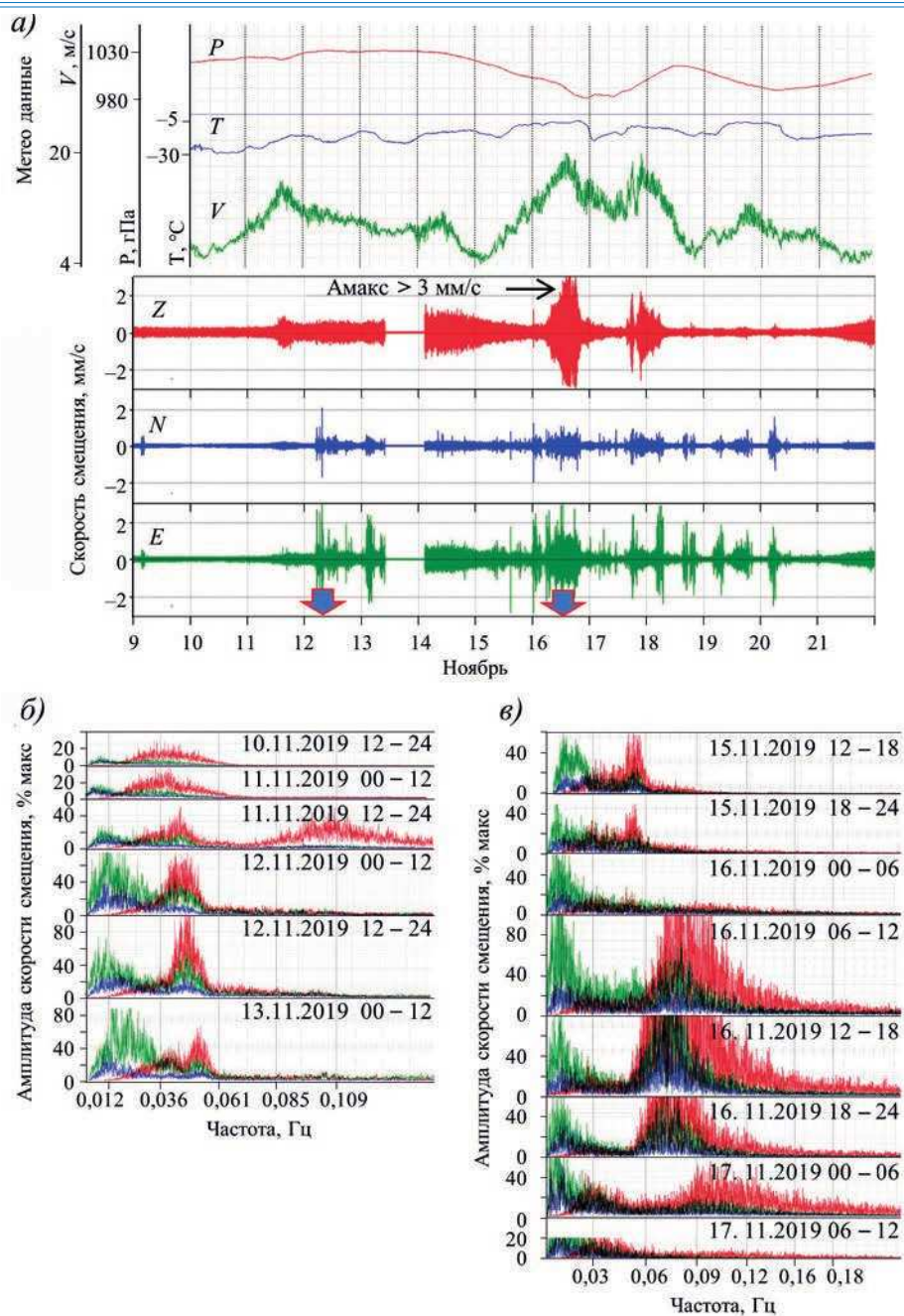


Рис. 3. Общая картина динамических процессов в ледяном покрове за период 9–21 ноября 2019 г.: а — временной ход колебаний льда (Z, N, E); б, в — амплитудные спектры. Стрелки — моменты образования трещин

Fig. 3. General picture of dynamic processes in the ice cover for the period November 9–21, 2019 а — the time course of ice oscillations (Z, N, E); б, в — amplitude spectra. Arrows — moments of crack formation

разрушения льда. Очевидно, что резкий спад амплитуды вертикальных колебаний во второй половине 16 ноября был обусловлен резким падением скорости ветра. Особенно хорошо выражены процессы деформирования льда на рисунках 3а, б, в, когда появляются интенсивные изгибно-гравитационные волны. Показано, что в конце 17 ноября снова возникли волны, указывающие на моменты воздействия ветра с изменчивой скоростью от 10 до 22 м/с. Это типичный случай проявления разлома ледяного поля при совпадении скорости ветра с фазовой скоростью изгибно-гравитационных волн, т. е. возникновении резонанса скоростей.

За весь период наблюдений 9–20 ноября интенсивность естественного фона вертикальных колебаний несколько уменьшилась, частота при этом оставалась постоянной на уровне 0,03 Гц, т. е. период фоновых гравитационных колебаний составлял около 30 с.

Как уже отмечалось, кроме вертикальных колебаний на записях сейсмометров и наклономеров появляются периодические горизонтальные цуги колебаний. Особенно подобное явление было заметным в период 17–20 ноября. На данный момент мы предполагаем, что эти процессы обусловлены локальными и/или протяженными периодическими сдвигами во льду, обусловленными приливными или инерционными движениями ледяного покрова. Периодические горизонтальные цуги с проявлениями почти полусуточного механического сплочения ледяных полей являются косвенными признаками возникновения процессов сжатия и торошения во льдах. Приливные сплочения и разрежения сопровождаются взаимодействием ледяных полей, образованием протяженных сдвигов с моментами торошения и образования гряд торосов. Все эти динамические процессы порождают комплекс упругих и гравитационных волн непосредственно в среде лед — вода. Судя по графикам рис. 3а (17–20 ноября), длительность приливного сжатия может составлять 3–5 ч. Это явление отклика льда на приливные процессы в океане можно назвать «эффектом приливного сжатия». Подобные результаты, как уже указывалось во введении, имеются в работах [2, 4, 11]. Очевидно, что события ноября 2019 г. с привлечением дополнительных данных по метеорологии, океанологии и спутниковым снимкам льда дадут более полную информацию о механизме крупномасштабной механики ледяного покрова в системе атмосфера — лед — океан.

Событие 22–27 декабря 2019 г. (рис. 4). Данное событие отмечалось цугом интенсивных вертикальных колебаний при относительно слабом ветре. На рис. 4а примерно в течение 50 ч отмечены два волновых поля (1 и 2) с изменяющимися периодами колебаний в диапазоне от 30 до 20 с (назовем такой спектр — «циклонический портрет»). В интервале времени несколько часов диапазон периодов вертикальных колебаний в цуге волн составлял 18–26 с. Это говорит о том, что по мере распространения цуга гравитационной волны его амплитуда уменьшалась, а спектр трансформировался до периодов 18–20 с.

Из спектров на рис. 4а и 4б видно, что за двое суток существования колебаний частота пиков уменьшилась с 0,048 до 0,032 Гц, т. е. в течение 50 ч произошло изменение частоты колебаний на 0,016 Гц. Этот факт позволяет связывать цуги вертикальных колебаний с циклонической деятельностью и оценивать расстояние до источника гравитационных волн. Рассмотренные фоновые события демонстрируют пример, когда на больших расстояниях от источника происходит генерация колебаний, регистрируемых на станции с частотой до 0,036 Гц и менее. Можно

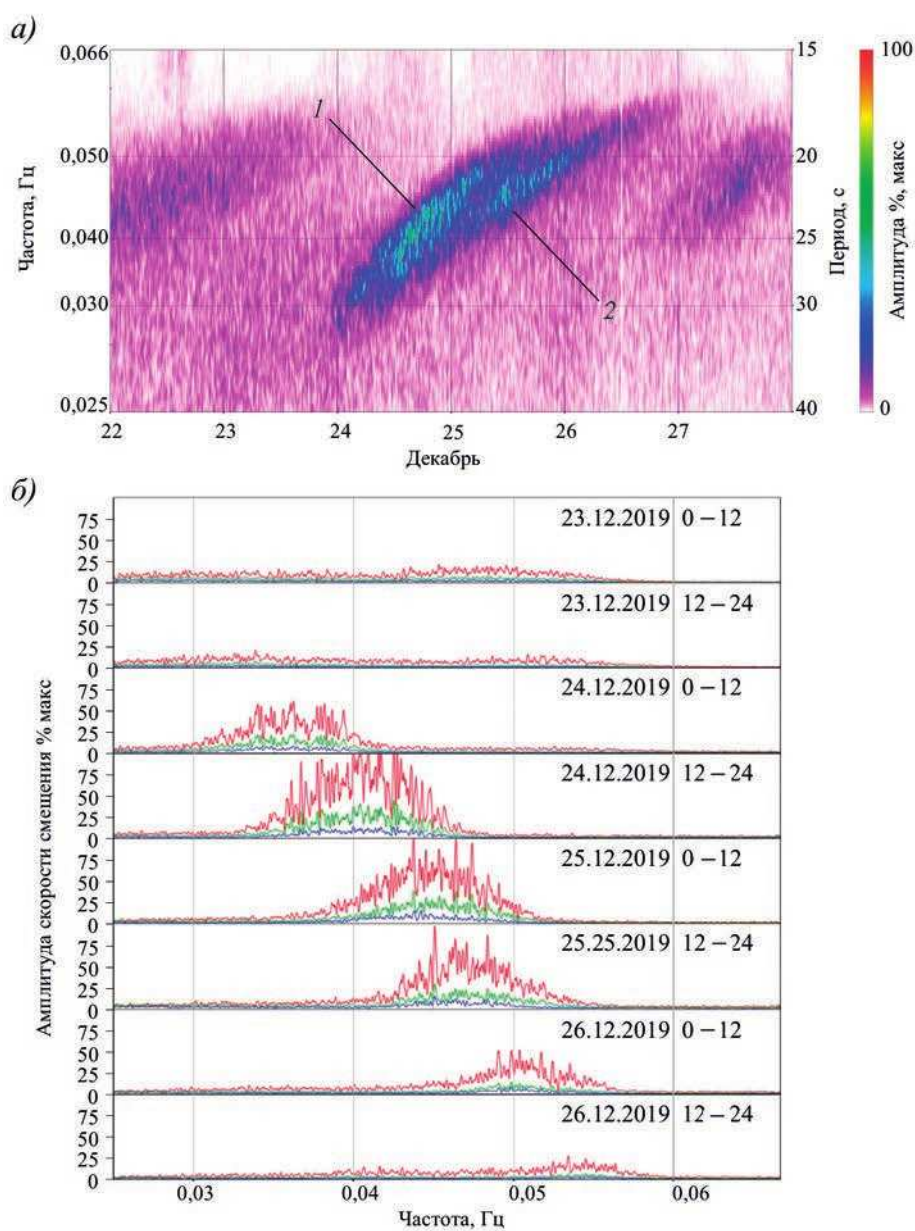


Рис. 4. Динамическое событие с интенсивным цугом поверхностных гравитационных волн в период 22–27.12. 2019.

Спектр непрерывного вейвлет-преобразования: а) — «портреты» двух циклонов (1 и 2); б) — серия спектров Фурье

Fig. 4. Dynamic event with an intense arc of surface gravitational waves in the period 22–27.12.2019.

The spectrum of the continuous wavelet transform: а) — “portraits” of two cyclones (1 and 2); б) — Fourier spectra series

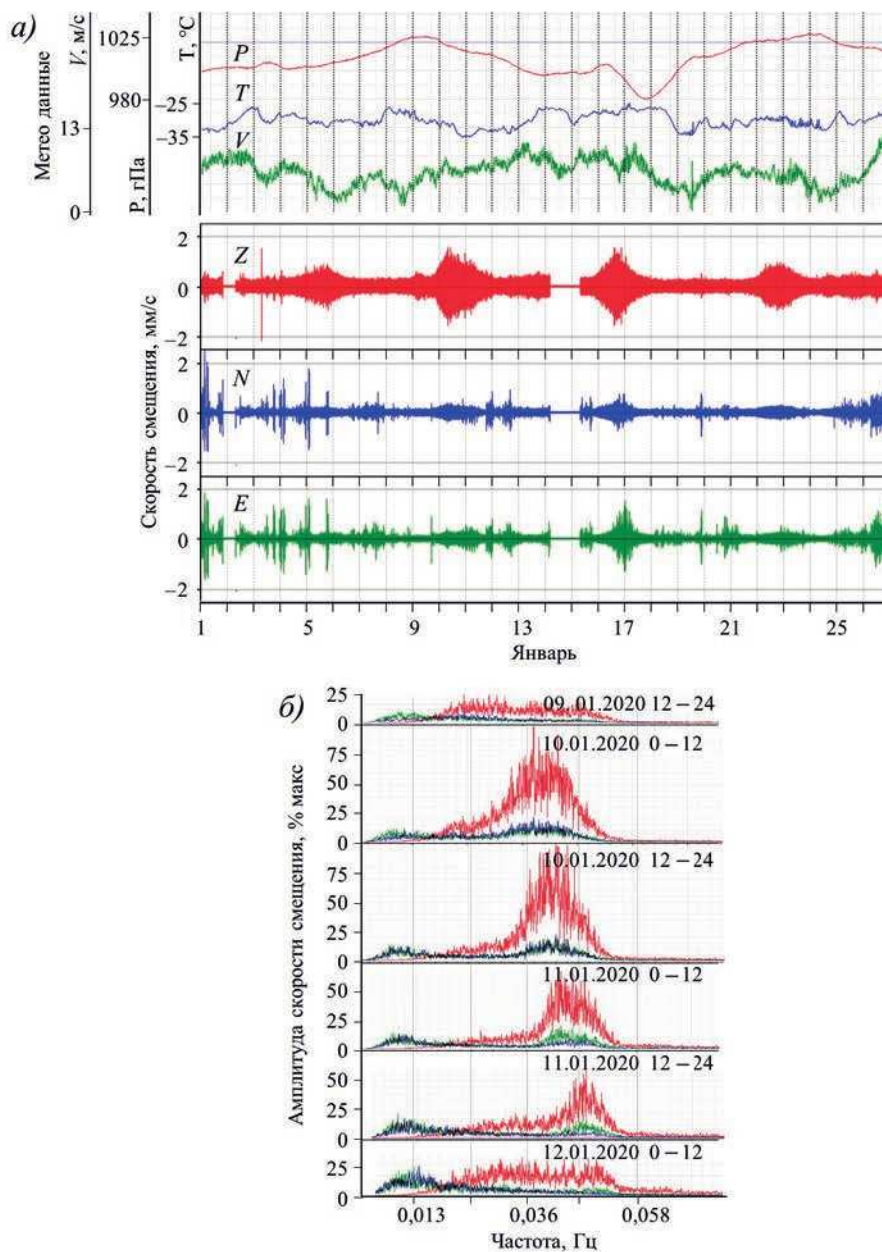


Рис. 5. Общая картина изменчивости колебаний в дрейфующем ледяном покрове за период 1–27.01.2020.

а) — временной ход колебаний льда (Z, N, E); б) — серия амплитудных спектров

Fig. 5. The general picture of the variability of fluctuations in the drifting ice cover for the period 1–27.01.2020.

а) — the time course of (Z, N, E); б) — a series of spectra

предположить, что на фоне существующих в океане инфрагравитационных волн могут возникать волны зыби от движущегося циклона со штормом на открытой воде на расстоянии 2–3 тысячи километров. Такое сочетание инфрагравитационных волн и приближающегося к дрейфующей станции циклона создает волновое поле, способное разрушить лед без видимых признаков внешнего воздействия. Приближение циклона к станции отмечается увеличением частоты волны, т. е. появлением дисперсионных волн штормовой зыби с периодом более 13 с. Если при этом отмечаются волны с более высокой частотой, то это является признаком зарождения трещин, локальных очагов разрушения льда и излучения изгибно-гравитационных волн с частотой менее 0,10 Гц.

К описанию спектров следует сделать следующее замечание. На рисунке 4а цифрами 1 и 2 отмечены два волновых поля, или два «портрета циклонов». Очевидно, что их образование связано с динамикой циклонов 24 и 25 декабря. Максимальные пики интенсивности колебаний отстоят друг от друга на 24 ч. Естественно, что необходимо в дальнейшем рассматривать зависимость частота-время для каждого события 1 и 2 отдельно, с привлечением карт одновременного движения двух циклонов по направлению к дрейфующей станции.

Событие 1–27 января 2020 г. На рис. 5 представлена общая картина изменчивости амплитуды колебаний в дрейфующем ледяном покрове за январь 2020 г. На уровне спокойного фона колебаний было зарегистрировано 4 цуга вертикальных колебаний льда с промежутками 4–6 дней (5, 10, 17 и 22 января). Можно видеть, что эти цуги слабо связаны со скоростью ветра. Важной особенностью графика являются горизонтальные колебания, по интенсивности не всегда сравнимые с цугами вертикальных колебаний, например, 10 и 16 января.

Для выявления механики подобных эффектов и источников колебаний на рис. 5б показан спектр одного из ярко выраженных событий 9–12 января. В спектре показана изменчивость амплитуд вертикальных и горизонтальных колебаний с пиками на периодах: вертикальные 30–20 с, горизонтальные колебания значительно слабее с периодом до 100 с. Визуально связи вертикальных колебаний льда с горизонтальными колебаниями и локальными метеоданными не отмечается. Однако в течение 9–12 января период волны уменьшился на 4–5 с. Аналогичная ситуация происходила 5, 15 и 23 января 2020 г. Видно, что повторяется картина с подобными характеристиками волновых явлений, как и в предыдущих событиях ноября и декабря 2019 г. На фоне инфрагравитационных волн вырастают цуги гравитационных волн от движущегося циклона.

Событие 16–18 февраля 2020 г. (рис. 6). Это событие очень похоже на динамический процесс, наблюдавшийся 16 ноября 2019 г. (см. рис. 3). Также происходило зашкаливание сейсмометров 16–17 февраля 2020 г. На записях самого начала интенсивных колебаний цуги гравитационных волн достигали максимума амплитуд более 5 мм/с. Не отмечалось уверенной связи колебаний со скоростью ветра, в течение нескольких часов наблюдался плавный рост колебаний, затем продолжительное зашкаливание и, наконец, плавное затухание (рис. 6а).

Рассмотрим спектральный состав процессов 16–17 февраля с применением вейвлет-преобразования (рис. 6б). Вся энергия колебаний оказалась расположенной в диапазоне частот 0,030–0,048 Гц. В течение 15–18 февраля отмечается увеличение частоты колебаний, или уменьшение периода волны. Скорость ветра составляла 5 м/с. Очевидно, что этот цуг колебаний является океанической гравитационной волной.

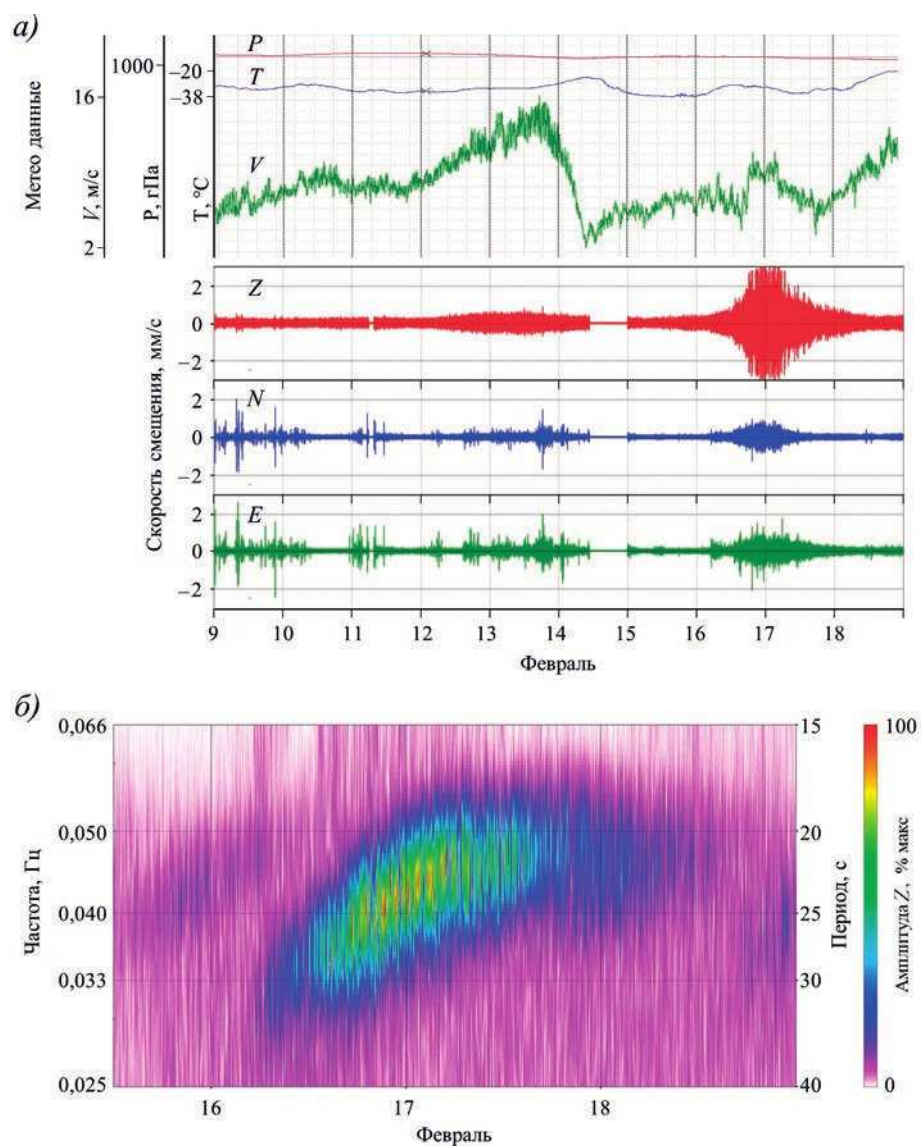


Рис. 6. Динамическое событие с интенсивными поверхностными гравитационными волнами в дрейфующем ледяном покрове в период 9–18.02.2020.

а) — временной ход (Z, N, E); б) — спектр непрерывного вейвлет-преобразования («портрет» циклона) за период 16–18.02.2020

Fig. 6. Dynamic event with intense surface gravitational waves in the drifting ice cover in the period 9–18.02.2020.

а) — the time course of Z, N, E; б) — the spectrum of continuous wavelet transformation (portrait of a cyclone) for the period 16–18.02.2020

В «портрете циклона» выделяются точки, амплитуда в которых достигает 5 мм/с и более. Кроме того, отмечаются периодические, с интервалом 30–60 минут как максимальные амплитуды вертикальных колебаний, так и увеличение частоты гравитационных океанических волн. Можно предположить, что во время пиков максимальных значений спектра происходили разрушения льда, т. е. от 16 февраля 18 час до 17 февраля 06 час. В событии 16–17 февраля вместе с основным энергонесущим пиком на частоте 0,04 Гц возникали пики на частоте 0,12–0,13 Гц (на рис. 6 не отмечено). Это указывает на очевидность трещинообразования и возникновения объемных и изгибных волн в момент локального разрушения льда в районе лагеря станции. Анализ временных рядов колебаний во льду в разных частотных полосах позволяет выявлять детали процесса трещинообразования и разрушения льда. Можно утверждать, что в событии 16–17 февраля основным «виновником» разрушения льда являлся цуг океанической гравитационной волны с периодом 25–27 с. Это важный факт для понимания механики разрушения ледяных полей при незначительной скорости ветра и отсутствии резонансного эффекта. (Визуальное описание разрушения льда сделано многими участниками экспедиции, а также зафиксировано в вахтенном журнале судна.)

События в марте 2020 г. Конец зимнего этапа наблюдений отметился похожими событиями, на основе которых можно создавать модели явлений в зимний период экспедиции. Графики временных ходов динамических процессов характеризовались строгой периодичностью, очевидно, связанной с зарождением циклонов и штормами в океане, распространением океанской зыби и существованием фоновых инфрагравитационных волн (рис. 7). Начало событий в период 1–5 марта отмечено интенсивным цугом вертикальных колебаний при слабой скорости ветра, т. е. очевидно, что это событие не ветрового происхождения. Как и в предыдущих примерах, данное событие могло возникать от далекого движущегося циклона с волнами зыби на фоне долгопериодных инфрагравитационных волн. Основной пик колебаний в рассматриваемый период отмечен на частоте 0,030 Гц.

Особое событие с разрушением льда произошло в период 10–13 марта при относительно слабом ветре на фоне вертикальных колебаний с таким же периодом около 30 с (рис. 7б).

Согласно амплитудным спектрам, общий фон инфрагравитационных колебаний на поверхности океана оставался постоянным в течение всего марта 2020 г. Четкий и постоянный пик колебаний на частоте 0,03 Гц позволяет сделать предположение о природе зарождения и длительного существования этих волн. Очевидно, что этот фон колебаний может быть обусловлен воздействием атмосферных процессов на поверхность океана и проявлением динамики штормов. Инфрагравитационные волны прямо не зарождаются в штормовом районе. Мощные штормовые волны в виде зыби вначале перемещаются к шельфовым наклонным побережьям, где может происходить нелинейное взаимодействие с излучением инфрагравитационных волн. Наблюдения в марте 2020 г. отмечались постоянным уровнем инфрагравитационных волн и эпизодическими цугами волн зыби от динамичных циклонов.

В отдельные моменты усиление скорости ветра привело к разрушению льда и, соответственно, возникновению изгибно-гравитационных колебаний на частотах 0,08–0,15 Гц. Из полученных данных следует, что ветер со скоростью до 20 м/с порождал изгибно-гравитационные волны в диапазоне периодов 5–12 с. Это одно из событий, когда мог образоваться резонансный эффект при совпадении скорости ветра

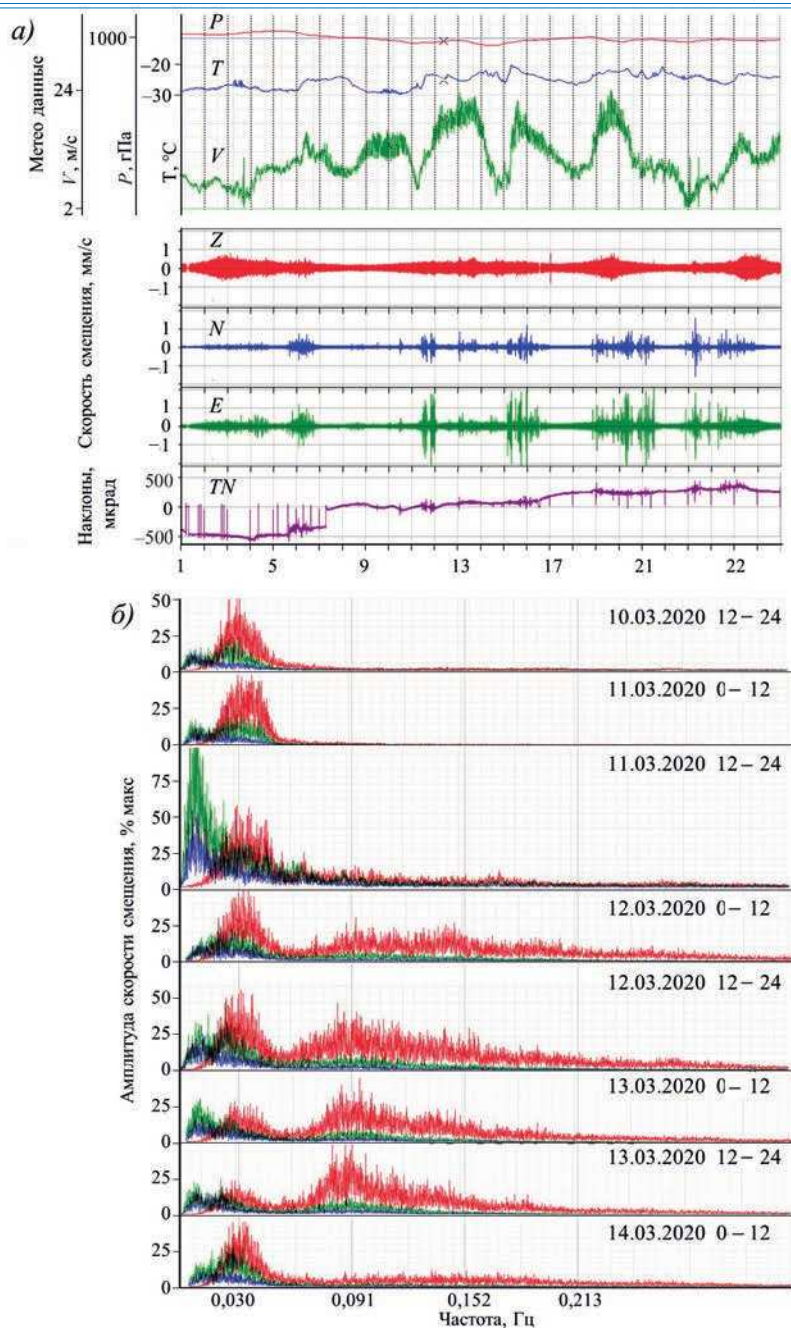


Рис. 7. Колебательные и волновые процессы в ледяном покрове за период 1–26 марта 2020 г.
 а) — временной ход скорости смещения (Z , N , E), наклоны льда (TN); б) — амплитудный спектр инфра-гравитационных волн и изгибных колебаний при разрушении льда

Fig. 7. Oscillatory and wave processes in the ice cover for the period March 1–26, 2020.

а) — the time course of the displacement velocity Z , N , E ; ice slopes (TN); б) — the amplitude spectrum of infra-gravitational waves and bending vibrations during the destruction of ice

и минимума фазовой скорости изгибно-гравитационных волн для данной толщины льда. Приведенные случаи создают предпосылки для возникновения предельной деформации изгиба ледяного поля и его разлома. Расчет напряжений при большой крутизне волны, т. е. при максимальной амплитуде и малой длине волны, позволяет утверждать, что основной механизм разрушения ледяного поля 12–13 марта был обусловлен изгибными деформациями ледяной пластины.

Горизонтальные колебания чередовались с некоторой периодичностью и независимо от метеоданных и от вертикальных цугов во льду. Этот факт указывает на возникновение явления излучения упругих волн при подвижках в сплоченном ледяном покрове.

Сочетание природных факторов — воздействие ветра, инфрагравитационных волн, волн зыби и приливных колебаний — привело к тому, что мартовские периоды были для льда одними из самых разрушительных. Эти процессы фиксировались также радиолокационной съемкой с судна «Поларштерн».

Важно отметить, что в мартовских событиях не отмечалось увеличение частоты гравитационных колебаний льда со временем, период которых был постоянным, около 30 с. Дисперсионный характер волн в период 10–14 марта не проявлялся, что позволяет предположить, что движения циклонов в данный период времени по направлению к дрейфующей станции не отмечалось, а пространственные масштабы района зарождения инфрагравитационных колебаний и их распространение имели геофизический масштаб.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Волновые процессы в морском льду являются одним из этапов динамической жизни ледяного покрова и рассматриваются как важные натурные данные для совершенствования моделей временного и пространственного масштаба процессов в системе атмосфера — лед — океан. В экспедиции MOSAiC динамические процессы регистрировались с помощью расстановки автономных сейсмических станций на льду с дискретностью отсчета 0,01 с. Это позволяло получать информацию о развитии физико-механических процессов в ледяном покрове при различных гидрометеорологических условиях. При этом во льду возникал широкий спектр волновых и колебательных процессов: от акустического диапазона трещинообразования до косвенных признаков колебаний в океане планетарного характера с периодами до 100 с и более.

Волновые спектры с периодами вертикальных колебаний 10–12 с характеризуют известное явление резонанса скоростей изгибно-гравитационных волн и ветра, при котором следует ожидать максимальные изгибные напряжения и, соответственно, механическое разрушение льда. Таким образом, можно контролировать время появления экстремальных ледовых событий, когда деформации при изгибе ледяного поля могут достигать разрушающих напряжений. В экспедиции MOSAiC в различные периоды зарегистрированы уникальные события разрушения льда гравитационными волнами, когда в условиях слабого ветра отмечались вертикальные колебания с элементами механики разрушения.

Известно, что приливные или инерционные колебания в СЛО, сопровождающиеся сплочением и разрежением льдов, могут совместно с ветром и течениями создавать периодические сжатия и торошения, образуя гряды торосов и разводья. В арктических льдах такие приливные процессы создаются в основном градиен-

тами приливного течения, передающими силовое воздействие ледяному покрову через касательные напряжения на границе лед — вода. Так же, как и в экспедиции ААНИИ «ТРАНСАРКТИКА-2019», длительность возможных приливных процессов с возникновением различного типа колебаний и волн составляла 3–5 часов. Отмечается синхронная регистрация сигналов с преимущественно горизонтальной направленностью на трех разнесенных на льду сейсмостанциях, в то время как вертикальные колебания в этот же период слабо выражены. Следует отметить, что это одна из приоритетных задач физики и механики приливных или инерционных явлений, которые могут успешно решаться на поверхности океана, покрытого льдом.

Полученная за зимний период наблюдений экспедиции MOSAiC статистика явлений сжатия и торошения во льдах указывает на процессы деформирования и разрушения льда от воздействия ветра, от океанических гравитационных волн, а также от возможных явлений приливного характера. Особенно это касается природы образования упорядоченной/блоковой структуры ледяного покрова. Перекрещивающиеся на спутниковых изображениях морского льда трещины и развоя указывают на вероятность образования относительно быстрых деформаций на больших площадях поверхности океана. Это, в свою очередь, может порождать упругие волны в среде лед — вода — морское дно.

Имеются натурные исследования, где показано влияние приливных явлений на напряженное состояние льда. В записях датчиков напряжений во льду выявлены спектральные пики напряжений с периодами от 11,9 час до 12,4 час величиной до 50 кПа. Авторы [2] указывают, что эти пики обусловлены приливным или инерционным воздействием на лед. Незначительная величина напряжений во льду во время таких крупномасштабных процессов позволяет сделать предположение о сравнительно низком уровне напряженного состояния ледяного покрова. Сочетание предварительно напряженного состояния льда, приливных и инерционных эффектов, а также реализация напряжений через трещины и автоколебания на значительных площадях создают высокоорганизованную динамику, которая приводит к появлению упорядоченной ромбовидной структуры ледяного покрова [6].

Выявленные особенности связи колебательных процессов с метеорологическими характеристиками указывают на характер распространения гравитационных волн с периодами до 30 с и более. Спектры океанских волн позволяют относить эти явления к инфрагравитационным волнам, порождаемым нелинейными взаимодействиями между штормовыми волнами зыби и морским дном [8, 9]. Взаимодействие интенсивных океанских штормовых волн с береговыми линиями шельфа приводит к возникновению уникального явления инфрагравитационных волн.

События 16 ноября и 23–26 декабря 2019 г. являются ярким примером явления дисперсии поверхностных волн в океане, когда на больших расстояниях от источника происходит увеличение длины и скорости волны. Изменчивость фона инфрагравитационных волн может служить предвестником зарождения волн зыби от движущегося со штормами циклона. Такое сочетание инфрагравитационных волн и приближающегося к дрейфующей станции циклона создает волновое поле, способное разрушить лед без видимых признаков внешнего воздействия. Приближение циклона к станции отмечается увеличением частоты колебаний или уменьшением периода волны, т. е. появлением волн штормовой зыби. Если при этом отмечаются волны с меньшим периодом, то это означает, что возникают изгибно-гравитацион-

ные волны с частотой 10–0,1 Гц, являющиеся показателями зарождения трещин и локальных очагов разрушения льда.

Таким образом, зимняя статистика циклонических проявлений волн во льду позволяет говорить о явлении возрастания в гравитационной волне частоты со временем. Точное время прибытия данной частоты внутри 12-часового временного ряда определяется из спектрального анализа участков длинных рядов наблюдений. Как правило, при интенсивном событии начальные вступления имеют частоту около 0,03 Гц, затем идет возрастание интенсивности и частоты. К концу цуга на уровне фона колебаний волна имеет частоту около 0,07 Гц. Графики носят дисперсионный характер волн, прибывающих от далеких штормовых событий. Для определения расстояния до источника волн можно использовать наблюдаемые в спектре соотношения частота – время [9]:

$$x = (g/4\pi f)(t - t_0),$$

где x — расстояние до источника, g — ускорение свободного падения, f — наблюдаемая пиковая частота, t — время наблюдения, t_0 — время появления волн. Проведенные расчеты расстояния источника океанических волн составляли тысячи километров [9]. Полученные в экспедиции MOSAiC данные об уменьшении частоты гравитационной волны со временем в диапазоне 0,048–0,032 Гц могут способствовать определению расстояния до источника поверхностных гравитационных волн. В дальнейшем подобные данные и расчеты с использованием карты движения наблюдаемых циклонов позволят совершенствовать модели прогнозирования процессов в системе атмосфера — лед — океан.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты мониторинга динамического состояния льда в экспедиции MOSAiC позволяют сделать первые выводы.

В течение нескольких месяцев получены натурные данные с помощью расстановки сейсмостанций на дрейфующем ледяном покрове СЛО. Описаны методы полевых дистанционных наблюдений и обработки исходных данных с применением спектрального анализа колебательных процессов в ледяном покрове. Выявлен широкий спектр волновых процессов, обусловленных динамическими явлениями в системе атмосфера — лед — океан.

Спектры вертикальных колебаний морского льда позволяют относить описанные явления к поверхностным гравитационным волнам океана. Существующие модели зарождения и распространения волн зыби и инфрагравитационных волн использованы для описания колебательных и волновых процессов на поверхности океана, покрытого льдом. Известно, что в открытом океане штормовая зыбь на первом этапе перемещается к шельфовым наклонным побережьям, где может происходить нелинейное взаимодействие с образованием инфрагравитационных волн, распространяющихся до кромки арктических льдов и далее в сплошном ледяном покрове. Полученные нами результаты в настоящее время не дают полной уверенности в том, что гравитационные волны с периодами до 40 с имеют соответствующее происхождение. Необходима постановка исследований в расширенном временном и пространственном масштабах, т. е. использование приборов для регистрации колебаний поверхности океана с периодами до сотен секунд на пространствах десятки-сотни километров.

Получены новые данные о низкочастотных колебаниях во льду, которые можно отнести к горизонтально-поляризованным волнам типа SH. Имеющиеся в литературе сведения о природе происхождения таких колебаний обусловлены сжатием льдов и подвижками по разрывам в сплоченном ледяном покрове. Сложно оценить параметры волны из-за малого расстояния между сейсмостанциями на льду. Зарегистрированные периоды горизонтальных колебаний составляли десятки секунд, и при дальнейших исследованиях необходимо организовывать схему наблюдений по треугольнику со сторонами десятки километров.

Рассмотрены возможности использования инструментального мониторинга возникновения и развития приливного сжатия и торошения в дрейфующих льдах СЛО. Первые результаты позволяют найти подходы к решению задач о механике деформирования льда и масштабах волновых полей при приливных или инерционных явлениях в океане. Очевидно, что выявление физической природы описанных процессов и их масштабов могут быть одной из приоритетных задач полярной океанологии.

Сейсмометрические методы, обладая беспрецедентным временным разрешением, позволяющим изучать динамические процессы с дискретностью отсчета 0,01 с в морском дрейфующем льду, представляют собой одно из основных средств исследования широкого спектра колебаний и волн при сжатии и торошении, при воздействии поверхностных и внутренних гравитационных волн на лед, при приливном и/или инерционном движении льдов.

Представленное описание методов исследования в зимний период и первые результаты в экспедиции MOSAiC дают возможность изучать ледовые явления в системе атмосфера — лед — океан в широком временном и пространственном масштабах. Комплексные результаты мониторинга состояния дрейфующего ледяного покрова с привлечением данных по метеорологии, океанологии и спутниковым снимкам льда будут способствовать совершенствованию физико-механических методов и моделей прогнозирования экстремальных природных явлений в Арктике. Стандартные данные метеостанции судна «Поларштерн» были успешно использованы при обработке материалов сейсмических наблюдений [12].

Конфликт интересов. У авторов нет конфликта интересов.

Competing interests. The authors have no competing interests.

Финансирование. Работа выполнена в рамках темы 5.1.5 ЦНТИ Росгидромета «Исследование крупномасштабной динамики, физических процессов, механики деформирования и разрушения морских льдов с целью совершенствования методов краткосрочного прогнозирования сжатия и торошения».

Данные, использованные в этой статье, были получены в рамках международной многопрофильной дрейфующей обсерватории по изучению арктического климата (MOSAiC) с пометкой MOSAiC20192020. Идентификатор экспедиции AWI_PS122 00.

Funding. The work was carried out within the framework of the topic 5.1.5 of the Central Research Institute of Roshydromet “Research of large-scale dynamics, physical processes, mechanics of deformation and destruction of sea ice in order to improve methods of short-term forecasting of compression and ridging”.

The data used in this manuscript was produced as part of the international Multidisciplinary drifting Observatory for the Study of the Arctic Climate (MOSAiC) with the tag MOSAiC20192020. Project_ID given for this specific Polarstern expedition is AWI_PS122 00

Благодарности. Стандартные данные метеостанции судна «Полярштерн» были успешно использованы при обработке материалов сейсмических наблюдений. Статья написана на основе данных инструментальных измерений, проведенных сотрудниками Лаборатории физики льда ААНИИ Николаем Колабутиным, Егором Шеманчуком, Игорем Шейкиным и Алексеем Ньюбом.

Acknowledgments. The standard data of the Polarstern weather station was successfully used in the processing of seismic observation materials. The article is based on the data of instrumental measurements carried out by employees of the AARI Laboratory of Ice Physics Nikolai Kolabutin, Egor Shemanchuk, Igor Sheikin and Alexey Nyubom.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Легеньков А.П. Подвижки и приливные деформации дрейфующего льда. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 104 с.
2. Tucker III W.B., Perovich D.K. Stress measurements in drifting Pack Ice // Cold regions science and technology. 1992. V. 20. № 2. P. 119–139. doi: 10.1016/0165-232X(92)90012-J.
3. Смирнов В.Н. Динамические процессы в морских льдах. СПб.: Гидрометеоздат, 1996. 162 с.
4. Aksenov Ye. Local scale deformations and stresses, and their relationship to the mesoscale ice internal stress field // Ice State final report. Helsinki Univ. of Technology. HUT, 1999. P. 100–148.
5. Hutchings J.K., Roberts A., Geiger C.A., Richter-Menge J. Spatial and temporal characterization of sea-ice deformation // Ann. Glaciol. 2011. V. 52. P. 360–368. doi: 10.3189/172756411795931769.
6. Смирнов В.Н., Чмель А.Е. Самоподобие и самоорганизация в дрейфующем ледяном покрове Арктического бассейна // Доклады Академии наук. 2006. Т. 5. С. 684–687. doi: 10.1134/S1028334X06080204.
7. Marchenko A., Morozov E., Muzylev S. Measurements of sea-ice flexural stiffness by pressure characteristics of flexural-gravity waves // Ann. Glaciol. 2013. V. 54 (64). P. 51–60. doi: 10.3189/2013AoG64A075.
8. Wadhams P., Doble M.J. Sea ice thickness measurement using episodic infragravity waves from distant storms // Cold Reg. Sci. Technol. 2009. V. 56. P. 98–101. doi: 10.1016/j.coldregions.2008.12.002.
9. Marsan D., Weiss J., Moreau L., Gimbert F., Doble M., Larose E., Grangeon J. Characterizing horizontally-polarized shear and infragravity vibrational modes in the Arctic sea ice cover using correlation methods // J. Acoust. Soc. Am. 2019. V. 145 (3). P. 1600–1608. doi: 10.1121/1.5094343. doi:10.1121/1.5094343.
10. Смирнов В.Н., Ковалев С.М., Ньюбом А.А. Автоколебания в дрейфующем ледяном покрове Северного Ледовитого океана // Океанологические исследования. 2019. Т. 47. № 3. С. 122–138. doi: 10.29006/1564–2291.JOR–2019.47(3).11.
11. Смирнов В.Н., Ковалев С.М., Ньюбом А.А., Знаменский М.С. Механика колебаний и волн во льдах Северного Ледовитого океана при явлениях сжатия и торошения // Проблемы Арктики и Антарктики. 2020. Т. 66. № 3. С. 321–336. doi: 10.30758/0555-2648-2020-66-3-321-336.
12. Schmithüsen H. Continuous meteorological surface measurement during POLARSTERN cruise PS122/4. 2021. URL: <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.935224> (дата обращения 04.04.2022).

REFERENCES

1. Legen'kov A.P. *Podvizhki i prilivnye deformatsii dreifuiushchego l'da*. Shearings and tidal deformations of drifting ice. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1988: 104 p. [In Russian].
2. Tucker III W.B., Perovich D.K. Stress measurements in drifting pack ice. Cold regions science and technology. 1992, 20 (2): 119–139. doi: 10.1016/0165-232X(92)90012-J.

3. *Smirnov V.N. Dinamicheskie protsessy v morskikh l'dakh.* Dynamical processes in sea ice. St. Petersburg: Hydrometeoizdat, 1996: 162 p. [In Russian].
4. *Aksenov Ye.* Local scale deformations and stresses, and their relationship to the mesoscale ice internal stress field. Ice State final report. Helsinki Univ. of Technology., HUT, 1999: 100–148.
5. *Hutchings J.K., Roberts A., Geiger C.A., Richter-Menge J.* Spatial and temporal characterization of sea-ice deformation. *Ann. Glaciol.* 2011, 52: 360–368. doi: 10.3189/172756411795931769.
6. *Smirnov V.N., Chmel' A.E.* Self-similarity and self-organization in drifting ice cover of the Arctic basin. *Doklady Akademii nauk.* Proc. of the Academy of Sciences. 2006, 5: 684–687. doi: 10.1134/S1028334X06080204. [In Russian].
7. *Marchenko A., Morozov E., Muzylev S.* Measurements of sea-ice flexural stiffness by pressure characteristics of flexural-gravity waves. *Ann. Glaciol.* 2013, 54 (64): 51–60. doi: 10.3189/2013AoG64A075.
8. *Wadhams P., Doble M.J.* Sea ice thickness measurement using episodic infragravity waves from distant storms. *Cold Reg. Sci. Technol.* 2009, 56: 98–101. doi: 10.1016/j.coldregions.2008.12.002.
9. *Marsan D., Weiss J., Moreau L., Gimbert F., Doble M., Larose E., Grangeon J.* Characterizing horizontally-polarized shear and infragravity vibrational modes in the Arctic sea ice cover using correlation methods. *J. Acoust. Soc. Am.* 2019, 145 (3): 1600–1608. doi: 10.1121/1.5094343.
10. *Smirnov V.N., Kovalev S.M., Niubom A.A.* Self-excited oscillations in the drifting ice cover of the Arctic Ocean. *Okeanologicheskie issledovaniia.* Oceanological Research. 2019, 47 (3): 122–138. doi: 10.29006/1564–2291.JOR–2019.47(3).11. [In Russian].
11. *Smirnov V.N., Kovalev S.M., Nubom A.A., Znamenskiy M.S.* Mechanics of oscillations and waves in the ice of the Arctic ocean during compression and ridging. *Problemy Arktiki i Antarktiki.* Arctic and Antarctic Research. 2020, 66 (3): 321–336. doi: 10.30758/0555-2648-2020-66-3-321-336. [In Russian].
12. *Schmithüsen H.* Continuous meteorological surface measurement during POLARSTERN cruise PS122/4. 2021. Available at: <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.935224> (accessed 04.04.2022).

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-68-1-48-63>
УДК 551.467



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

Исследование ледовой обстановки Обской губы по современным спутниковым данным в 2007–2017 гг.

А.Д. Тарасенко¹, В.В. Селюженко^{2*}, Н.В. Сандалюк³,
И.А. Абрамова¹, Д.М. Демчев⁴

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

² — Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова, Росгидромет,
Москва, Россия

³ — Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле,
Санкт-Петербург, Россия

⁴ — Технический университет Чалмерса, Гетеборг, Швеция

*v1selyuzhenok@oceanography.ru

Резюме

Обская губа — район бурно развивающейся добычи нефти и газа. Знание текущих ледовых условий необходимо для безопасности береговой и подводной инфраструктуры. Целью данного исследования является оценка сроков ледовых явлений и отдельных характеристик (скорость дрейфа, локализация стамух и торосов) в южной и центральной части Обской губы с 2007 по 2017 г. Анализируя ежедневные визуальные данные MODIS и имеющиеся снимки Sentinel-1 SAR, мы определили даты начала устойчивого ледообразования, начало формирования и взлома припая, наступление безледного периода. В целом по данным с 2007 по 2017 г. наблюдается тенденция уменьшения существования ледяного покрова. Образование морского льда начинается позже, а взлом припая — раньше по сравнению со средними многолетними наблюдениями (1947–2010 гг.). Также были определены скорость дрейфа морского льда и распространение торосов. Отсутствие в районе крупных стамух было подтверждено результатами алгоритма автоматической обработки РСА-изображений.

Ключевые слова: ледовая обстановка, Новый Порт, Обская губа, спутниковые данные, MODIS, Sentinel-1.

Для цитирования: Тарасенко А.Д., Селюженко В.В., Сандалюк Н.В., Абрамова И.А., Демчев Д.М. Исследование ледовой обстановки Обской губы по современным спутниковым данным в 2007–2017 гг. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2022. Т. 68. № 1. С. 48–63. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-1-48-63>.

Поступила 31.08.2021

После переработки 28.02.2022

Принята 22.03.2022

A study of sea ice regime in the Obskaya guba Bay using modern satellite data in 2007–2017

Anastasia D. Tarasenko¹, Valeria V. Selyuzhenok^{2*}, Nikita V. Sandalyuk³,
Irina A. Abramova¹, Denis M. Demchev⁴

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

² — N.N. Zubov State Oceanographic Institute, Roshydromet, Moscow, Russia

³ — St. Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, St. Petersburg, Russia

⁴ — Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden

*v1selyuzhenok@oceanography.ru

Summary

The Obskaya guba Bay is a region of rapidly developing oil and gas exploration. Knowing the current sea ice conditions including dangerous phenomena e. g. ridges and stamukhas is important for the safety of coastal and underwater construction as well as for ecological risk assessment. With this study, we aim to obtain new data on sea ice seasonal cycle in the southern and central part of the Obskaya guba Bay for 10 years (from 2007 to 2017) and to demonstrate the capacity of satellite data in obtaining varying sea ice characteristics in the region. Analyzing daily visual MODIS and available Sentinel-1 SAR imagery, we derived dates of sea ice and fast ice formation, fast ice breakup and melt onset and the onset of ice-free period. For this purpose the satellite data were analyzed manually by sea ice expert. In addition, of sea ice ridges were derived and the sea ice drift data were automatically processed in order to locate motionless sea ice features — stamukhas. The distribution of sea ice floes and field size in the region was derived from MODIS data. The analysis showed that there is a tendency towards a shorter ice covered period based on the data from 2007 to 2017. Overall, the formation of sea ice starts 9 days later and fast ice breakup occurs 16 days earlier compared to the long-term mean (1947–2010). The majority of ridges were located in the central part of the region and directed along the coast. The analysis confirmed absence of large stamukhas visible to be applied method (with a horizontal size of 100 m). The predominant sea ice field size range lies 500–1500 m. The study shows that a combination of images obtained in the optical range of the survey with radar data makes it possible to supplement the classical visual assessments with the results of automatic methods for detecting fast ice, detecting stamukha, as well as ice drift and deformation.

Keywords: MODIS, Noviy Port, Obskaya guba Bay, satellite data, sea ice regime, Sentinel-1.

For Citation: Tarasenko A.D., Selyuzhenok V.V., Sandalyuk N.V., Abramova I.A., Demchev D.M. A study of sea ice regime in the Obskaya guba Bay using modern satellite data in 2007–2017. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2022, 68 (1): 48–63. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-1-48-63>.

Received 31.08.2021

Revised 28.02.2022

Accepted 22.03.2022

ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие промышленности Российской Федерации, добыча газа и его транспортировка в районах Крайнего Севера связаны с обеспечением безопасности всех операций в тяжелых климатических условиях. Работы, выполняемые в морских или прибрежных условиях, требуют оценки основных характеристик гидрологического и ледового режима (волнения, течений, колебаний уровня, ледовой обстановки). Продолжительность существования ледяного покрова, его изменчивость, наличие припая, торосов, стамух, айсбергов оказывают существенное влияние на инженерные сооружения и судоходство.

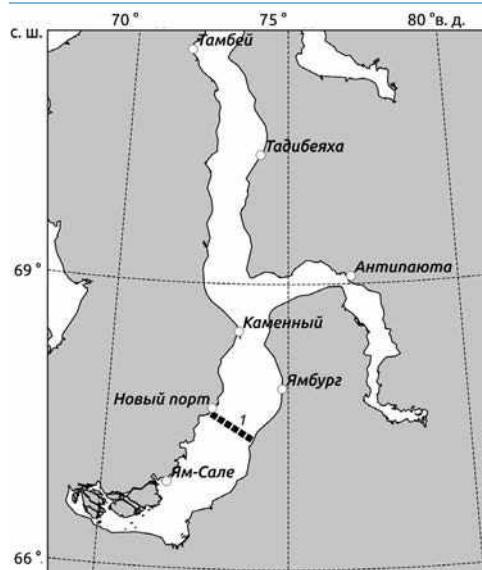


Рис. 1. Обская губа. Границы исследуемого района в окрестностях Нового Порта соответствуют 69°–66° с. ш. 1 — схематичный маршрут подводного трубопровода между Ямбургом и Новым Портом [1]

Fig. 1. Obskaya guba Bay. The region of interest near the Noviy Port is limited by 69° and 66° latitudes. The underwater pipeline connects Yamburg and Noviy Port [1]

тами сбора информации, включая натурные исследования, спутниковые данные и моделирование. Натурные исследования, а также результаты моделирования ледяного покрова в Карском море подробно описаны в работе [3]. Методы, основанные на использовании спутниковых изображений видимого диапазона, а также радиолокационных (и некоторых других) данных, успешно применяются при исследовании акваторий северных морей, активно используются в ААНИИ на протяжении долгого времени и продолжают совершенствоваться [4, 5].

Большую часть года Обская губа покрыта льдом. Процесс формирования устойчивого ледяного покрова в районе исследования начинается в первой половине октября (средняя дата, рассчитанная для периода 1947–2010 гг., — 10 октября, амплитуда между наиболее ранней и поздней датой — 36 дней), а окончательное замерзание акватории происходит во второй половине октября — начале ноября [6]. Наиболее раннее появление льда отмечается на прибрежном мелководье вблизи мыса Дровяной и бухты Новый Порт. Наличие в воде запаса тепла и воздействие течений определяют замерзание акватории примерно на одну декаду позже перехода температуры воздуха через ноль градусов. В зимний период Обская губа покрывается припаем, максимальное развитие которого наблюдается в апреле-мае [7].

У западного побережья Обской губы с большим количеством отмелей молодой лед появляется через 2–3 суток после установления температуры воздуха ниже 0 °C,

Активная хозяйственная деятельность в Обской губе, связанная с освоением нефтегазовых месторождений и повышенным трафиком Северного морского пути (СМП) может оказывать влияние на гидрологический и ледовый режим отдельных акваторий. В районе Нового Порта через Обскую губу пролегал подводный газопровод «Газ Ямала» (рис. 1) [1]. Трубопроводы являются источником потенциального загрязнения и вместе с другими элементами инфраструктуры нефтегазовой индустрии представляют собой особую опасность для окружающей среды в условиях низких температур, где местные экосистемы очень медленно восстанавливают нарушенный баланс [2]. В таких условиях рекомендуется проводить регулярный мониторинг опасных гидрометеорологических явлений для обеспечения безопасности инженерных сооружений и минимизации экологических рисков.

Для оценки рисков, связанных с неблагоприятными гидрометеорологическими факторами, следует пользоваться всеми доступными инструмен-

а у восточного, более приглубого берега — через 6–8 суток. В годы с холодной осенью сало и шуга образуются уже во второй декаде сентября. На установление припая оказывают большое воздействие соленость воды и ветровой режим. Неподвижный лед обычно устанавливается вдоль береговых отмелей при толщине молодого льда 20–30 см. Исключением является дельта реки Оби, где ледостав наступает при толщине льда 15 см.

В среднем толщина льда в Обской губе на конец апреля достигает 1,4–1,7 м [6]. Данные величины обладают межгодовой изменчивостью и зависят от климатических условий и толщины снежного покрова, которая в южной и средней частях губы изменяется от 3–5 до 40 см. В бухтах и прибрежных участках губы снежный покров достигает 50–70 см.

Преобладающие значения скорости дрейфа льда лежат в диапазоне 0,1–0,15 м/с, максимальные значения достигают 0,8 м/с [11].

Разрушение ледяного покрова в южной части Обской губы начинается в конце мая. В северной части губы припай взламывается в начале июня под воздействием ветра и волнения, тем самым смещая северную границу припая до бухты Тамбей. После взлома припая в акватории губы образуются поля плавучих льдов сплоченностью 9–10 баллов с характерными размерами ледяных полей около 2 км и обломками полей около 0,5 км. В конце июня очищается южная часть губы, затем центральная часть. Северная часть губы очищается ото льда в последнюю очередь во второй половине июля. При благоприятных условиях полное очищение губы ото льда наступает в июне — первой половине июля, а при неблагоприятных — в середине августа (средняя дата — 1 июля по данным за 1947–2010 гг. [6]). Размах сроков очищения ото льда, по многолетним данным, составляет около полутора-двух месяцев [7, 8] (37 дней по данным за 1947–2010 гг. [6]), т. е. приход гидрологической и биологической весны растягивается по акватории губы на месяц и более [9]. С конца июля по начало октября в Обской губе ледяной покров полностью отсутствует. Таким образом, средняя продолжительность ледового периода в исследуемой акватории составляет 290 суток, максимальная — 300 суток. Средняя продолжительность безледного периода составляет 75 суток [10].

Целью данной статьи является демонстрация возможностей современного спутникового мониторинга гидрометеорологической обстановки для локальных исследований в устьевых областях на примере Обской губы и района Нового Порта в частности.

Наиболее полно общий гидрологический режим Обской губы представлен в работе [6], основанной на данных наблюдений станций и постов, экспедиций и спутниковых изображений с 1945 по 2013 г., однако оценка сроков ледовых явлений была получена по более коротким рядам и не затрагивает последнее десятилетие спутниковых наблюдений. Так, для Нового Порта в работе [6] представлены характеристики за период с 1947 по 2010 г., для остальных пунктов наблюдений период исследования заканчивается в конце 1990-х. Задача данной работы — получить новую информацию о ледовом режиме за период с 2007 по 2017 г. по данным дистанционного зондирования. Для анализа межгодовой изменчивости были оценены сроки ледовых явлений, продолжительности ледового сезона и существования припая. На примере отдельных сезонов были получены оценки скоростей дрейфа, локализованы торосы, а также апробирован алгоритм обнаружения стамух.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ

В исследовании были использованы спутниковые данные видимого диапазона, полученные с помощью спектрорадиометра среднего разрешения MODIS, установленного на спутниках Terra и Aqua, а также изображения радиолокатора с синтезированной апертурой (PCA) SAR-C, установленного на спутниках Sentinel-1. Ежедневные данные Aqua-Terra/MODIS (L2 и L3) с пространственным разрешением 250 м были собраны в коллекцию снимков с 2007 по 2017 г. в весенние и осенние месяцы, для дней, когда облачность позволяла различить подстилающий покров. Данные Sentinel-1/SAR-C доступны с 2014 г., когда был запущен первый из двух спутников (Sentinel-1A). В 2016 г. был запущен второй спутник Sentinel-1B с аналогичным PCA на борту. Данные Sentinel-1 имеют пространственное разрешение около 40 м в режиме широкополосной съемки “Extrawide mode” (EW). На основе этих данных была подготовлена коллекция снимков с 2014 по 2017 г., охватывающая периоды замерзания и таяния ледяного покрова. PCA-изображения Sentinel-1 находятся в свободном доступе на сайте <https://scihub.copernicus.eu/>, данные MODIS — на сайте <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/>.

В данном исследовании мы считаем осенними месяцы с сентября по ноябрь, весенними — с апреля по июнь. Это связано с особенностями ледового режима Обской губы, которая летом полностью освобождается ото льда, а зимой полностью покрыта припаем. Таким образом, процессы становления льда, формирования припая и его разрушения наиболее интересны в указанные месяцы. Границы исследуемого района в окрестностях Нового Порта соответствуют 69°–66° с. ш. (средняя и южная часть Обской губы).

Для расчета дрейфа льда и выделения припая был использован алгоритм, описанный в работе [12] с использованием PCA-данных Sentinel-1. Алгоритм рассчитывает скорость дрейфа на основе результатов прослеживания характерных точек (feature tracking) и кросс-корреляционного анализа блоков последовательных изображений.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Ледостав и формирование припая

Подробные данные о периодах ледостава и ледотаяния для изучаемой акватории представлены в табл. 1, составленной на основе анализа снимков MODIS в районе исследования в 2007–2017 гг.

В центральной части Обской губы ледяной покров наблюдается с октября по июль (рис. 2). Процессы ледообразования начинаются в конце второй декады октября (с 13 по 25 октября) и заканчиваются в середине ноября (с 4 по 21 ноября): медианная средняя продолжительность устойчивого ледообразования составляет 26 дней, минимальная — 21 день, максимальная — 33 дня. Средняя дата начала ледообразования в 2007–2017 гг. (19 октября) наступала на 9 дней позже по сравнению со средней датой по данным наблюдений в районе Новый Порт за 1947–2010 гг. [6].

Припай (связанный с берегом неподвижный ледяной покров) начинает формироваться очень быстро у обоих берегов Обской губы, в среднем через 4 дня (от 0 до 13 дней) с момента начала ледостава (табл. 2, рис. 2а). Его непосредственное воздействие на береговую зону и дно состоит прежде всего в изменении динамических условий в прибрежной зоне, а также в создании специфических форм рельефа дна (борозд, углублений, валов и др.). На основе анализа спутниковых данных можно сделать вывод, что устойчивый припай начинает формироваться в конце третьей

Таблица 1

Периоды ледостава и ледотаяния для изучаемой акватории на период 2007–2017 гг.,
по данным ИСЗ Terra/Aqua MODIS

Table 1

Periods of sea ice formation and melt onset for the study region between 2007 and 2017,
based on the Terra/Aqua MODIS data

Год	Ледотаяние	Ледостав
2007	08.06–10.07	20.10–13.11
2008	15.06–06.07	15.10–16.11
2009	10.06–10.07	20.10–11.11
2010	10.06–13.07	25.10–21.11
2011	30.05–30.06	25.10–20.11
2012	30.05–20.06	23.10–18.11
2013	07.06–15.07	15.10–16.11
2014	05.06–01.07	14.10–04.11
2015	28.05–15.06	13.10–15.11
2016	07.06–28.06	25.10–15.11
2017	07.06–02.07	24.10–20.11

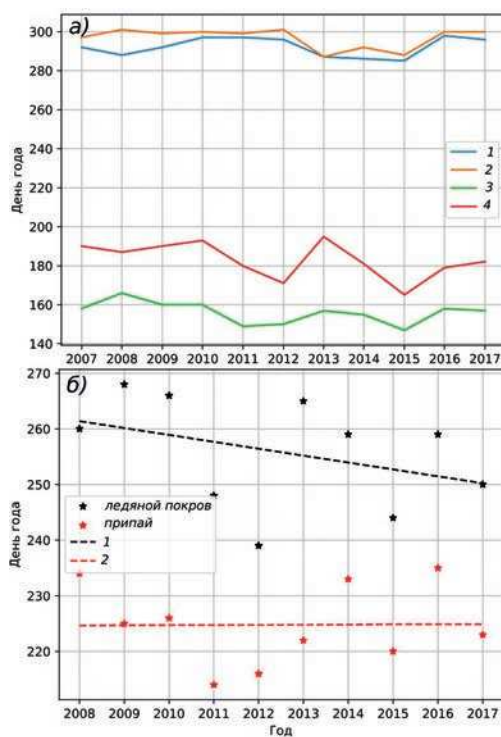


Рис. 2. Сроки ледовых явлений.

а) 1 — начало ледостава, 2 — формирование припая, 3 — начало таяния припая, 4 — полное освобождения Обской губы ото льда (день года); б) 1 — продолжительность существования ледяного покрова, 2 — припай (см. пояснение в тексте)

Fig. 2. Dates of sea ice events

а) 1 — sea ice formation, 2 — fast ice formation, 3 — onset of fast ice decay, 4 — onset of the ice-free period in the Obskaya guba Bay (day of the year); б) the duration of 1 — the persisting sea ice, 2 — the fast ice period

Фазы образования и взлома припая

Table 2

Phases of fast ice formation and breakup

Год	Дата первого образования припая	Начало взлома припая	Окончательное разрушение припая	Продолжительность существования припая (дней за сезон)
2007	25.10	08.06	10.07	258
2008	28.10	15.06	06.07	251
2009	27.10	10.06	10.07	256
2010	28.10	10.06	13.07	258
2011	27.10	30.05	30.06	246
2012	28.10	30.05	20.06	235
2013	15.10	07.06	15.07	273
2014	20.10	05.06	01.07	254
2015	16.10	01.06	15.06	242
2016	27.10	28.05	28.06	244
2017	28.10	07.06	02.07	247

Примечание: Продолжительность существования припая указана для сезона, напр. ледовый сезон 2007/08 указан как 2008 г.

Footnote: Duration of the fast ice season, e. g. 2008 stands for winter 2007–2008.

декады октября (табл. 2). В отдельные годы зафиксировано образование припая в середине октября.

В период становления припая наблюдается его достаточно сильная пространственная неоднородность. Первый припайный лед в исследуемом районе образуется у восточного берега, его средняя ширина в первую неделю ледостава варьируется в диапазоне 5–7 км, а в юго-восточном районе акватории ширина может достигать 20 км (рис. 3). У западного берега припай начинает образовываться позже, по всей видимости, это связано с особенностями динамики вод в данном районе. Здесь ширина припая на начальном этапе формирования составляет около 10 км. Первичное образова-

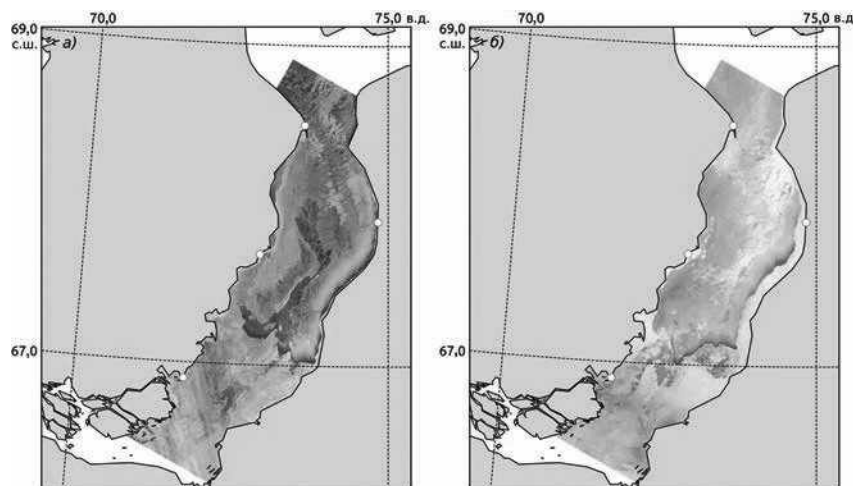


Рис. 3. Снимок MODIS припая и дрейфующего льда за 19.10.2008 и 03.11.2008

Fig. 3. MODIS imagery depicting fast ice and pack ice on 19.10.2008 and 03.11.2008

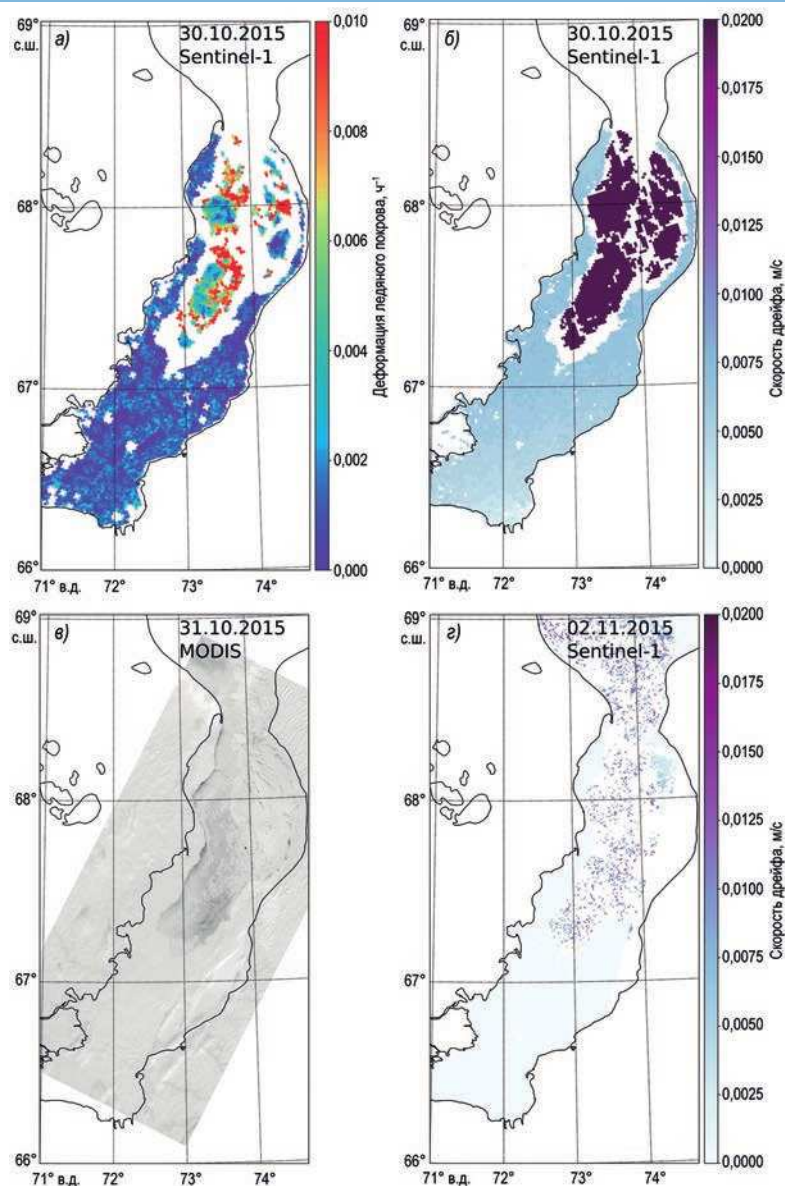


Рис. 4. Ледовая обстановка 30 октября (а, б), 31 октября (в), 2 ноября (з) 2015 г.: а) — деформация ледяного покрова (нормализована к 1 часу); б, з) — скорость дрейфа льда и припай по данным Sentinel-1/SAR-C; в) — дрейфующий лед и припай по данным MODIS

Fig. 4. Sea ice conditions on October 30 (а, б), October 31 (в), and November 2 (з), 2015: а) — sea ice deformation; б, з) — sea ice drift speed (m/s) and fast ice from Sentinel-1/SAR-C; в) — pack ice and fast ice from the MODIS imagery

ние припая у западного берега наблюдается в небольших вторичных заливах и бухтах, где лед меньше подвержен воздействию течения и ветра, в то время как большую часть центральной части акватории занимают начальные виды льда и нилас (рис. 3).

Увеличение площади припая происходит быстро. На рис. 4 представлены результаты обработки серии снимков Sentinel-1 (*а, б, в*) и MODIS (*г*), иллюстрирующих интенсивное нарастание припая и область дрейфующих льдов 30 октября — 2 ноября 2015 г. Наиболее интенсивные деформации ледяной покров испытывает в центральной области исследуемого района (рис. 4*а*), тогда как в зоне припая она минимальна. Стоит отметить, что даже небольшие подвижки льда потенциально могут привести к его нагромождению и образованию торосов.

Во время ледостава припай определяется как зона ледяного покрова с нулевой скоростью дрейфа (рис. 4*б*), в то время как расчетная средняя скорость перемещения дрейфующего льда составляет 0,02 м/с. Столь умеренная расчетная скорость дрейфа по сравнению с известными скоростями порядка 0,2 м/с может объясняться по-разному: (1) скорость дрейфа рассчитывается для временного интервала 7 ч (время между соседними снимками); (2) скорость дрейфа во время становления припая постепенно снижается [13], расчетные снимки как раз соответствуют времени формирования припая. В эстуарной зоне, где возможно влияние полусуточного прилива, характерного для Карского моря, за 7 ч происходит чуть больше половины приливного цикла, то есть влияния приливных и отливных течений компенсируют друг друга. На рис. 4*г* приведен снимок MODIS, иллюстрирующий ледовую обстановку 31 октября 2015 г. (30 октября область исследования была закрыта облачностью): площадь припая увеличивается в размерах, а центральный массив дрейфующих льдов сдвигается на север, с выносом ледяных полей в Карское море.

Площадь припая в третьей декаде октября по средним многолетним данным составляет 485 км², в первой декаде ноября — 3700 км², и уже к третьей декаде ноября на всей акватории образуется ледяной покров, который можно классифицировать как припай. Средняя продолжительность существования припая в исследуемом районе составляет 251 день. Максимальная — 258 дней, минимальная — 235 дней. Полная информация о продолжительности существования припая представлена в табл. 2. Средняя продолжительность существования ледяного покрова составляет 259 дней, максимальная — 268 дней, минимальная — 239 дней. Наблюдается слабая линейная тенденция по уменьшению продолжительности существования ледяного покрова (примерно 1,2 день/год на рассмотренном промежутке времени), однако для сроков существования припая значимой тенденции в период с 2007 по 2017 г. не выявлено.

Таяние льда

Взлом припая, приуроченный к началу таяния льда в акватории, приходится на первую декаду июня и начинается со стороны его кромки. Средняя дата взлома припая — 5 июня. Самый ранний взлом припая в период 2007–2017 гг. пришелся на конец мая (28.05), самый поздний — на середину июня (15.06). В среднем взлом припая в 2007–2017 гг. наступал на 16 дней раньше по сравнению со средней многолетней (1945–2011 гг.) датой — 21.06 [6].

Таяние льда начинается с южной части акватории. Как правило, через 10–12 дней начинается взлом припая в северной части исследуемого района, которая освобождается ото льда в последнюю очередь. Медианная средняя продолжительность ледотаяния составляет 28 дней, минимальная — 18, максимальная — 38 дней, что несколько превышает время намерзания льда. Это означает, что весной может наблюдаться большее количество дрейфующего льда большей толщины по сравнению с осенью, т. е. существует риск образования ледяных заторов.

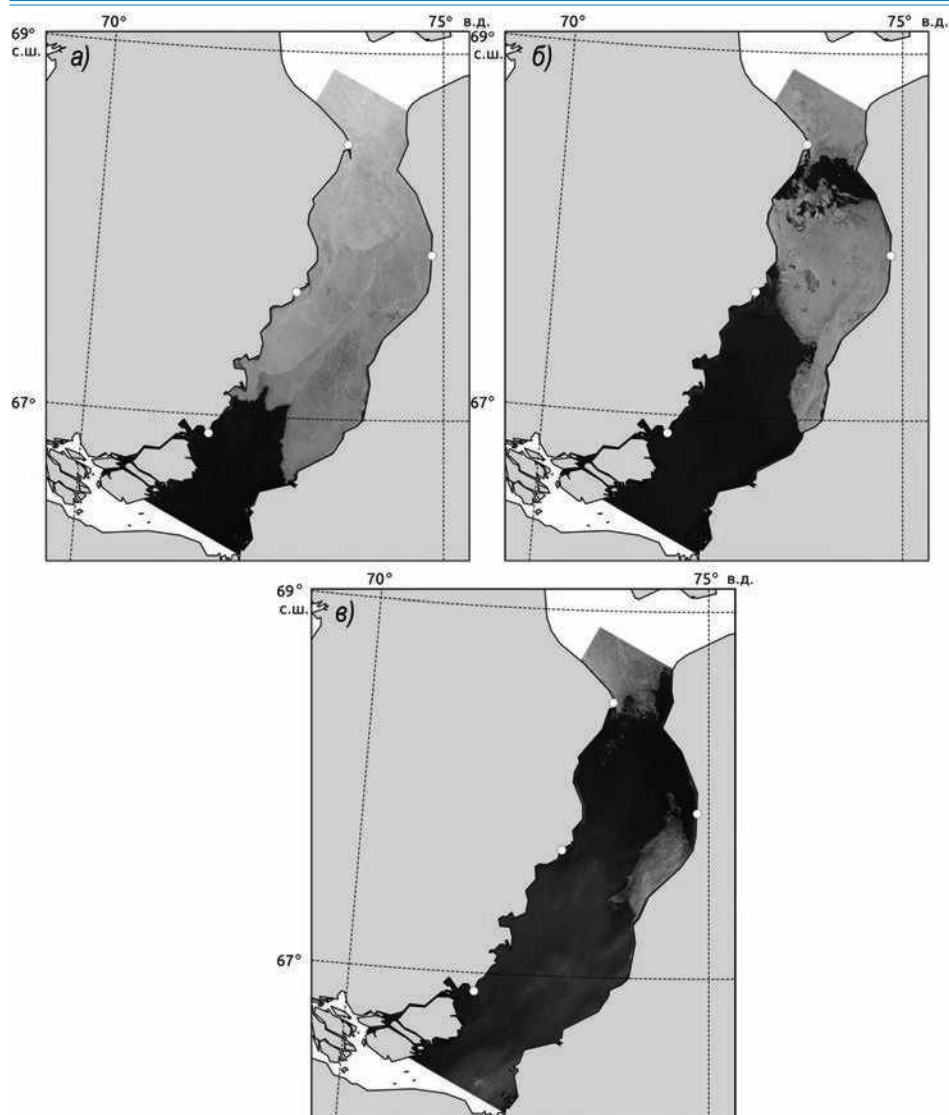


Рис. 5. Иллюстрация процесса очищения акватории Обской губы ото льда по спутниковым данным видимого диапазона MODIS за 19 июня (а), 29 июня (б) и 5 июля (в) 2008 г.

Fig. 5. Sea ice melt on visible MODIS imagery for 19 June (a), 29 June (b) and 5 July (v) of 2008

На рис. 5 представлена серия снимков MODIS на период ледотаяния 19 и 20 июня и 5 июля 2008 г.: хорошо виден разрушающийся припай в центральной части Обской губы и быстрое освобождения акватории ото льда. В первой декаде июня чистая вода занимает в среднем 5 % площади исследуемой акватории. Для второй декады июня она увеличивается до 40 %, а для третьей декады — до 75 %. На приведенных снимках также отчетливо видно, как увеличивается количество седиментов, выносимых р. Обью во время половодья (по данным <https://arcticgreatrivers.org/>

discharge/#Ob_Salekhard максимальный расход воды р. Оби происходит в среднем с начала июня до начала июля).

Ледяные образования

В период ледообразования в исследуемой акватории отмечается чрезвычайно высокая сплоченность дрейфующего льда, которая на период ледостава варьируется в диапазоне 7–9 баллов. В связи с этим в период ледостава преобладают большие ледяные поля (от 500 до 2000 м), а также обширные зоны скопления битого льда.

При анализе геометрических размеров ледяных полей на период осеннего ледостава с 2007 по 2017 г. были проанализированы 24 снимка MODIS. В соответствии с рекомендациями «Руководства по производству ледовой авиаразведки» была выполнена экспертная оценка характерных размеров и площадей ледяных полей согласно номенклатуре. Результаты анализа представлены в табл. 3. Результаты статистической обработки данных дешифрирования и измерений представлены в табл. 4.

Таблица 3

Диапазон размеров ледяных полей

Table 3

The size range of sea ice fields			
Диапазон размеров ледяных полей	Характеристика горизонтальных размеров полей	Количество льдин в интервале	Суммарная площадь льдин, км ²
100–500 м	Обломки ледяных полей	7	0,9
500–2000 м	Большие ледяные поля	47	39,6
2000–10000 м	Обширные ледяные поля	29	278
>10000 м	Гигантские ледяные поля	4	301

Таблица 4

Статистика горизонтальных размеров ледяных полей

Table 4

Statistics of the longitudinal sea ice filed sizes			
Характеристики	Ширина, м	Длина, м	Площадь, км ²
Среднее значение	2172	1688	7,1
Медиана	1008	1396	1,16
Стандартное отклонение	1974	3307	19,5
Минимальное значение	134	229	0,022
Максимальное значение	12174	18762	132,3

Результаты показывают, что наиболее характерные горизонтальные размеры ледяных полей лежат в диапазоне 500–1500 м (большие ледяные поля). Следует принять во внимание тот факт, что пространственное разрешение снимков MODIS не позволяет обнаруживать ледяные поля с горизонтальными размерами меньше разрешающей способности аппаратуры (менее 250–300 м), что исключает из общей выборки малые ледяные поля и обломки.

Кроме того, как было отмечено выше, в результате неравномерного распределения скоростей дрейфа льда, при сжатии, а также при нажимном дрейфе происходит разрушение дрейфующего льда, что может приводить к формированию торосов и наслоений льда. В результате визуального анализа снимков MODIS за 2007–2017 гг. было обнаружено 103 крупные гряды торосов (рис. 6). Средняя длина выделенных

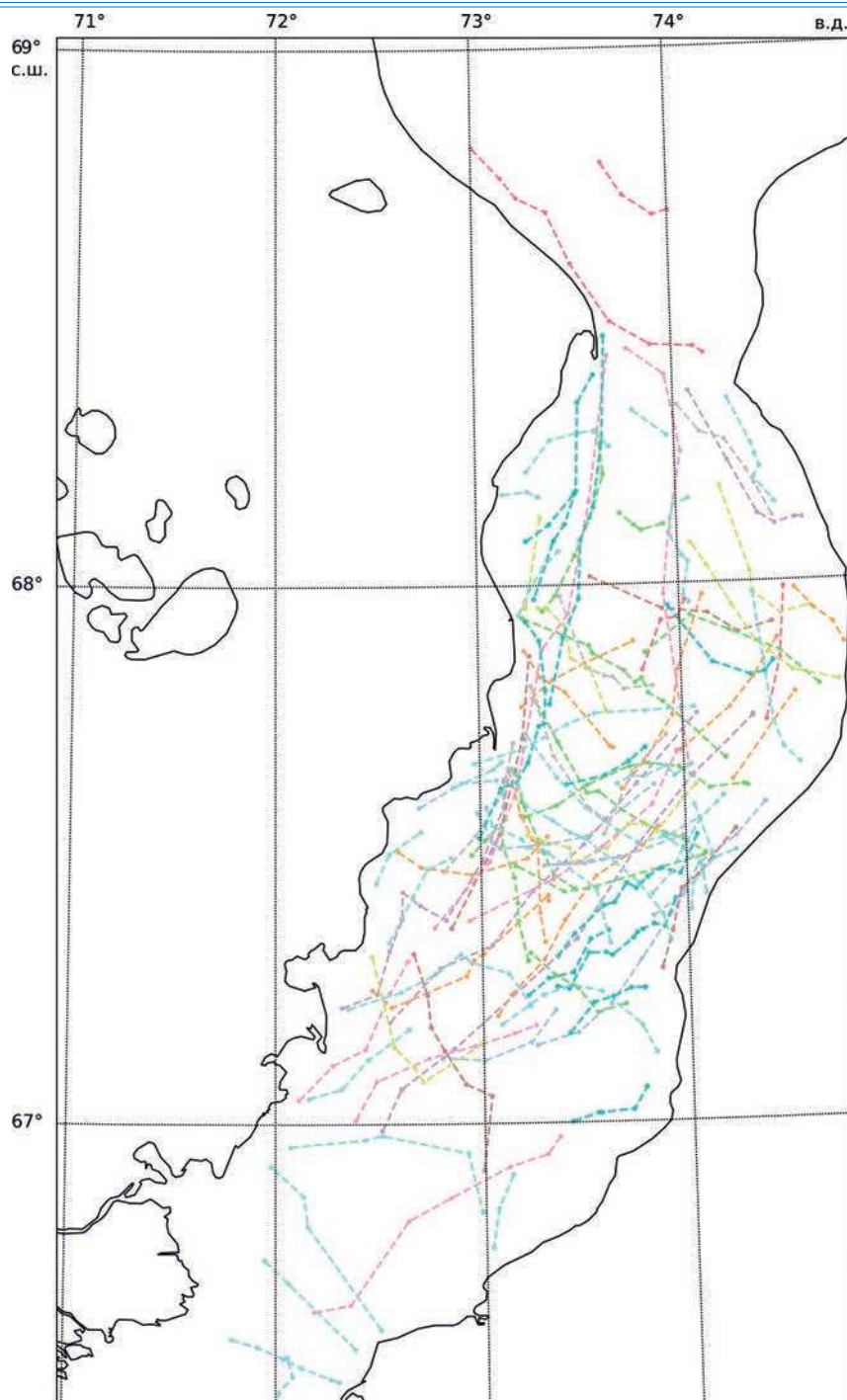


Рис. 6. Выделенные гряды торосов на основе анализа изображений MODIS с 2007 по 2017 г.

Fig. 6. Sea ice ridges detected from the MODIS imagery between 2007 and 2017

скопления составляет 38,7 км, СКО 16,3 км. Обнаруженные торосы в основном ориентированы параллельно берегу, что может объясняться взаимодействием припая и дрейфующего льда как под влиянием ветра, так и приливной деятельности. Как и в случае с оценкой размеров ледяных полей, стоит учитывать, что более мелкие зоны торошенного льда и отдельные торосы не могут быть обнаружены на спутниковых снимках среднего разрешения.

С помощью автоматического метода расчета дрейфа [12] была предпринята попытка выделения стамух. Стамухи образуются при набивании льда вокруг севшего на мель ледяного тороса, они выделяются на картах дрейфа как неподвижные объекты с учетом топографии дна, приливной и ветровой деятельности.

Несмотря на относительно высокое пространственное разрешение данных широкополосной съемки Sentinel-1 (40 м), использованные методы не выявили наличия стамух. Одной из причин можно считать повсеместное развитие припая, мало подверженного смещению даже с учетом сильной приливной деятельности, отмеченной в районе исследования, а также, вероятно, из-за небольшого размера самих стамух. Дополнительно стоит указать, что временной интервал между ближайшими последовательными снимками Sentinel-1 примерно совпадает с половиной цикла полусуточного прилива (около 7 ч между снимками), таким образом, любое перемещение льда может нивелироваться за счет приливно-отливной деятельности. Кроме того, данные авиаразведки (1972–1991 гг.) указывают на отсутствии стамух в южной части Обской губы [2]. Тем не менее автоматические методы требуют дальнейшего совершенствования для их применения в условиях наличия более мелких опасных ледяных образований, что может быть достигнуто с помощью использования оптических и радиолокационных спутниковых данных высокого пространственного разрешения, например снимков спутника Sentinel-2/MSI с разрешением до 10 м или РСА-изображений, полученных в режиме детальной съемки (5–25 м).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные спутниковые методы выгодно дополняют существующие натурные наблюдения и позволяют получить статистические оценки ледовых объектов, таких как припай, размеры дрейфующих ледяных полей и гряд торосов. На основе анализа изображений спутникового дистанционного зондирования Земли в видимом и радиолокационном диапазонах были получены данные о времени наступления ледообразования, формирования припая, начале таяния и разрушения припая и датах очищения ото льда южной и центральной части Обской губы с 2007 по 2017 г. Установлено, что, по сравнению со средними многолетними данными, в период исследования наблюдалось более позднее (на 9 дней) начало ледообразования и более ранний (на 16 дней) взлом припая.

В работе было показано, что в Обской губе, в районе Нового Порта, припай формируется одновременно с началом ледостава и, в среднем, в течение месяца полностью покрывает район исследования. После продолжительной зимы (около 250 дней) во время максимальных расходов реки Оби начинается взлом ледяного покрова, который также длится около 28 дней. За время исследуемого периода продолжительность существования ледяного покрова несколько сокращалась (с тенденцией около 1 день/год), при этом сроки существования припая сохранялись неизменными. Было отмечено, что в 2007–2017 гг. в исследуемом районе преобладали большие ледяные поля (500–2000 м), а также гряды торосов с протяженностью около 30 км.

Комплексирование снимков, полученных в оптическом диапазоне съемки, с радиолокационными данными позволяет дополнить классические визуальные оценки результатами автоматических методов выделения припая, детектирования стамух, а также дрейфа и деформаций льда.

Конфликт интересов. Авторы исследования не имеют конфликта интересов.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №19-35-60033.

Благодарности. Спутниковые данные MODIS и Sentinel-1 предоставлены для открытого пользования на порталах <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/> и <https://scihub.copernicus.eu/>

Competing interests. The authors state no conflict of interests

Funding. The study was carried out with a financial support of the Russian Foundation for basic Research, project No 19-35-60033.

Acknowledgments. The satellite data from MODIS and Sentinel-1 is freely available at <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/> and <https://scihub.copernicus.eu/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. «Газпром нефть» запустила арктический подводный газопровод «Газ Ямала» через Обскую губу Карского моря. URL: <https://nangs.org/news/midstream/pipelines/gazprom-neft-zapustila-arkicheskij-podvodnyj-gazoprovod-gaz-yamala-cherez-obskuyu-gubu-karskogo-morya> (дата обращения 07.04.2022).
2. Куликова О.А., Мазлова Е.А., Бродик Д.И., Кудрова Е.П., Ткачев Н.В. Нефтяное загрязнение территорий западного побережья Обской губы // Проблемы Арктики и Антарктики. 2019. Т. 65 (1). С. 105–112. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2019-65-1-105-117>
3. Ледяные образования морей Западной Арктики: Монография / Под ред. Г. К. Зубакина. СПб.: ААНИИ, 2006. 272 с.
4. Смирнов В.Г. Спутниковый мониторинг опасных ледяных образований в районах эксплуатационных работ на морских месторождениях углеводородного сырья // Проблемы Арктики и Антарктики. 2012. № 1. С. 103–120.
5. Миронов Е.У., Смирнов В.Г., Бычкова И.А., Клячкин С.В., Дымент Л.Н., Захваткина Н.Ю., Май Р.И., Гузенко Р.Б., Саперштейн Е.Б., Михальцева С.В., Платонова Е.В., Старцев Л.А. Экспериментальный аппаратно-программный комплекс спутникового мониторинга и прогноза ледовой обстановки // Проблемы Арктики и Антарктики. 2017. № 2. С. 15–26. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2017-0-2-15-26>
6. Войнов Г.Н., Налимов Ю.В., Пискун А.А., Становой В.В., Усанкина Г.Е. Основные черты гидрологического режима Обской и Тазовской губ (лед, уровни, структура вод). СПб.: Изд-во «Нестор-История», 2017. 186 с.
7. Ким С. Д., Финагенов О. М., Уварова Т. Э. Определение ледовых нагрузок на сооружения континентального шельфа по нормам различных стран // Вести газовой науки. 2013. № 3 (14). С. 97–103.
8. Лапин С.А. Гидрологическая характеристика Обской губы в летне-осенний период // Океанология. 2011. Т. 51. № 6. С. 984–993.
9. Стунжас П.А., Маккаев П.Н. Объем вод Обской губы как фактор формирования гидрохимической неоднородности // Океанология. 2014. Т. 54 (5). С. 622–634. doi: 10.7868/S0030157414050128.
10. Ильин Г.В. Гидрологический режим Обской губы как новой области морского природопользования в Российской Арктике // Наука юга России. 2018. Т. 14. № 2. С. 20–32.

11. Оганов Г.С., Митрофанов И.Б., Карпов А.М., Карулина М.М., Карулин Е.Б., Благовидова И.Л., Тертышников А.С. Анализ возможных ледовых воздействий на ледостойкое сооружение в районе месторождения Каменномысское-море // Современные подходы и перспективные технологии в проектах освоения нефтегазовых месторождений российского шельфа. 2018. № 4 (36). С. 123–130.
12. Selyuzhenok V., Demchev D. An application of sea ice tracking algorithm for fast ice and stamukhas detection in the Arctic // Remote Sensing. 2021. V. 13 (18). <https://doi.org/10.3390/rs13183783>
13. Selyuzhenok V., Mahoney A., Krumpen T., Castellani G., Gerdes R. Mechanisms of fast-ice development in the south-eastern Laptev Sea: a case study for winter of 2007/08 and 2009/10 // Polar Research. 2017. T. 36 (1). URL: <https://doi.org/10.1080/17518369.2017.1411140> (дата обращения 20.02.2022).

REFERENCES

1. «Gazprom neft'» zapustila arkticheskii podvodnyi gazoprovod «Gaz Yamala» cherez Obskuiu gubu Karskogo moria. Gazprom Neft launched the Gaz Yamal subsea gas pipeline across the Ob Bay of the Kara Sea. Available at: <https://nangs.org/news/midstream/pipelines/gazprom-neft-zapustila-arkticheskij-podvodnyj-gazoprovod-gaz-yamala-cherez-obskuyu-gubu-karskogo-morya> (accessed 07.04.2022). [In Russian].
2. Kulikova O.A., Mazlova E.A., Bradik D.I., Kudrova E.P., Tkachev N.V. Oil pollution of the western Gulf of the Ob coast. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2019, 65 (1): 105–112. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2019-65-1-105-117>. [In Russian].
3. *Ledianye obrazovaniia morei Zapadnoi Arktiki*. Ice formations of the seas of the Western Arctic: Monograph. Ed. G. K. Zubakin. St. Petersburg: AARI, 2006: 272 p. [In Russian].
4. Smirnov V.G. Satellite monitoring of hazardous ice formations in the areas of exploitation at offshore hydrocarbon deposits. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of the Arctic and Antarctic. 2012, 1: 103–120. [In Russian].
5. Mironov E.U., Smirnov V.G., Bychkova I.A., Kljachkin S.V., Dyment L.N., Zahvatkina N.Yu., Maj R.I., Guzenko R.B., Sapershtejn E.B., Mihal'ceva S.V., Platonova E.V., Starcev L.A. Experimental hardware-software complex of satellite monitoring and forecast of ice conditions. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2017, 2: 15–26. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2017-0-2-15-26>. [In Russian].
6. Vojnov G.N., Nalimov Y.V., Piskun A.A., Stanovoj V.V., Usankina G.E. The main features of the hydrological regime of the Ob and Taz bays (ice, levels, water structure) / Ed. G. N. Vojnov. St. Petersburg: Nestor-History, 2017: 186 p. [In Russian].
7. Kim S.D., Finagenov O.M., Uvarova T.E. Determination of ice loads on the structures of the continental shelf according to the norms of different countries. *Vesti gazovoy nauki*. Gas Science Bulletin. 2013, 3 (14): 97–103. [In Russian].
8. Lapin S.A. Hydrological characteristics of Obskaya guba in summer autumn period. *Okeanologia*. Oceanology. 2011, 51 (6): 984–993. [In Russian].
9. Stunzhas P.A., Makkaveev P.N. The volume of the Obskaya bay as a factor in the formation of hydrochemical heterogeneity. *Okeanologia*. Oceanology. 2014, 54 (5): 622–634. doi: 10.7868 / S0030157414050128. [In Russian].
10. Ilyin G.V. Hydrological regime of the Gulf of Ob as a new area of marine nature management in the Russian Arctic. *Nauka iuga Rossii*. Science of the South of Russia. 2018, 14 (2): 20–32. doi: 10.23885 / 2500-0640-2018-14-2-20-32. [In Russian].
11. Oganov G.S., Mitrofanov I.B., Karpov A.M., Karulina M.M., Karulin E.B., Blagovidova I.L., Tertyshnikova A.S. Analysis of possible ice impacts on an ice-resistant structure in the area of the Kamennomysskoe-sea field. *Sovremennye podkhody i perspektivnye tekhnologii v proektakh osvoeniia*

neftegazovyykh mestorozhdenii rossiiskogo shel'fa. Modern approaches and advanced technologies in projects for the development of oil and gas fields on the Russian shelf. 2018, 4 (36): 123–130. [In Russian].

12. *Selyuzhenok V., Demchev D.* An application of sea ice tracking algorithm for fast ice and stamukhas detection in the Arctic. *Remote Sensing*. 2021, 13 (18): 3783.

13. *Selyuzhenok V., Mahoney A., Krumpen T., Castellani G., Gerdes R.* Mechanisms of fast-ice development in the south-eastern Laptev Sea: a case study for winter of 2007/08 and 2009/10. *Polar Research*. 2017, 36 (1). Available at: <https://doi.org/10.1080/17518369.2017.1411140>. (accessed 20.02.2022).

МЕТЕОРОЛОГИЯ И КЛИМАТОЛОГИЯ METEOROLOGY AND CLIMATOLOGY

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-1-64-75>

УДК 551.467



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

Оценка влияния метеорологических параметров на изменчивость площади и толщины морского льда в Карском море

У.В. Прохорова

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

yliwa@rambler.ru

Резюме

В работе приведена количественная оценка влияния метеорологических параметров, таких как температура воздуха, влагосодержание атмосферы, нисходящее длинноволновое излучение, на толщину и площадь льда в Карском море. На основе установленных связей предложена регрессионная модель прогноза площади льда Карского моря с заблаговременностью 3 месяца. Рассмотрено удаленное влияние на площадь льда в Карском море аномалий от средней температуры поверхности океана в тропиках Северной Атлантики. Установленная значимая корреляция может послужить основанием для прогноза площади льда Карского моря с заблаговременностью до трех лет.

Ключевые слова: изменение климата, Карское море, морской лед, прогноз.

Для цитирования: Прохорова У.В. Оценка влияния метеорологических параметров на изменчивость площади и толщины морского льда в Карском море // Проблемы Арктики и Антарктики. 2021. Т. 68. № 1. С. 64–75. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-1-64-75>.

Поступила 08.11.2021

После переработки 24.12.2021

Принята 29.12.2021

Assessing the influence of meteorological parameters on sea ice area and thickness variability in the Kara Sea

Uliana V. Prokhorova

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

yliwa@rambler.ru

Summary

The reduction of the sea ice area in the Arctic is one of the most notable consequences of climate change, with the Kara Sea contributing about 5 % to the overall reduction. The aim of this study is to assess the impact of changes in climatic conditions on the reduction of the area and thickness of the sea ice in the Kara Sea and the possibility of using the established dependencies for climate forecasting. The article provides quantitative estimates of the

relationship between interannual changes in the sea ice thickness and sea ice extent in the Kara Sea and climate changes in the region and the remote influence of the sea surface temperature in the tropical North Atlantic for 1979–2019. The paper uses observation data obtained at meteorological stations, ERA5 reanalysis and data on the sea ice extent from the Arctic and Antarctic Research Institute website. In summer, the melting of sea ice is largely due to changes in the surface air temperature (correlation coefficient from -0.57 to -0.91). In winter, the ice thickness depends on the sum of frost degree-days ($r = -0.80$). The temperature regime, in turn, is determined by the radiation balance, namely, by the variability in the long-wave flow due to the increase in the water vapor content. On the basis of the relationships established, a linear regression model is proposed for forecasting the sea ice area with a lead time of about three months. The model is effective and statistically significant. The paper considers the remote influence of the sea surface temperature anomalies in the North Atlantic tropics on the ice coverage of the Kara Sea. The response of the sea ice extent to the sea surface temperature in the low latitudes is 30–34 months late. The significant correlation between the anomalies can serve as a basis for predicting the sea ice area in the Kara Sea with a lead time of up to three years.

Keywords: climate change, forecast, Kara Sea, sea ice.

For Citation: Prokhorova U.V. Assessing the influence of meteorological parameters on sea ice area and thickness variability in the Kara Sea. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2022, 68 (1): 64–75. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-1-64-75>.

Received 08.11.2021

Revised 24.12.2021

Accepted 29.12.2021

ВВЕДЕНИЕ

Сокращение площади морского льда в Арктике является одним из наиболее заметных следствий глобального потепления. За период с 1979 по 2019 г. среднегодовая площадь морского льда в Арктике уменьшилась более чем на 2 млн км². Сокращение площади, занятой морским льдом в сентябре, составило с 1980 по 2019 г. 3,16 млн км² (49,9 %), а в марте 1,51 млн км² (10,6 %) [1]. Влияние потепления на наблюдаемые изменения в ледовых условиях очевидно из значений коэффициентов корреляции между изменениями летней приповерхностной температуры воздуха в морской Арктике и площадью морского льда в сентябре, которая за 1980–2016 гг. составила $-0,93$ [2]. Влияние потепления климата также проявляется в изменении толщины и возраста морского льда. Доля многолетнего морского льда (в возрасте от 5 лет) уменьшилась с 30 % до 2 % в период с 1979 по 2018 г., а количество однолетнего морского льда увеличилось с 40 % до 60–70 % [3]. Толщина льда в Центральной Арктике, по данным спутниковой альтиметрии, уменьшилась на 65 %: с 3,59 м до 1,25 м за период с 1975 по 2012 г. [4].

Вклад сибирских арктических морей в общее сокращение площади морского льда составляет около 35 %, а на долю Карского моря приходится 5 % [5]. В межгодовых изменениях площади льда в сибирских морях преобладают долгопериодные колебания, наиболее значительные среди арктических морей [6].

На межгодовую изменчивость площади морского льда в Карском море в холодную половину года влияет приток теплой и соленой воды из Атлантики [7, 8]. В работах [9, 10] была показана определяющая роль изменений притока воды из Атлантики на площадь льда в Баренцевом море в холодную часть года. Истоки изменений найдены в тропической области Северной Атлантики, где повышение температуры поверхности воды через 2–3 года проявляется в температуре атлантической воды на разрезе по Кольскому меридиану и сокращении зимней площади льда в Северном Ледовитом океане [2].

Цель данного исследования — оценка влияния изменений климатических условий на сокращение площади и уменьшение толщины морских льдов в Карском море и возможности использования установленных зависимостей для климатического прогнозирования.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

В работе использованы данные реанализа ERA5 [11] за 1979–2019 гг., включающие температуру воздуха на уровне 2 м и нисходящий поток длинноволновой радиации. Данные о площади морского льда в Карском море за период с 1979 по 2019 г. получены на сайте ФГБУ «ААНИИ» [12]. Данные по толщинам припая за период 1979–2016 гг. были собраны в отделе ледового режима и прогнозов ФГБУ «ААНИИ» из наблюдений на арктических станциях, расположенных на побережье Карского моря (м. Стерлегова, м. Голомянный, о. Белый, о. Визе, Марресале, Диксон). Ряды данных были приведены к стационарным: из данных был удален тренд и сезонные колебания.

Для валидации данных ERA5 по приповерхностной температуре воздуха был использован архив мирового центра данных (г. Обнинск). Суммы градусо-дней мороза рассчитаны по суточным данным температуры воздуха на станциях: м. Стерлегова, м. Голомянный, о. Белый (ГМО им. М.В. Попова), о. Визе, Марресале, Диксон, Малые Кармакулы.

Физическая зависимость толщины нарастания морского льда от температуры воздуха определена в работах [13, 14]. В случае с толщинами льда до 1 м зависимость нарастания льда от температуры определяется уравнением:

$$H^2(t) = H_0^2 + 2 \int_0^t \left(\lambda \frac{\Theta - T_0}{L' \rho} - \frac{F_w H}{L' \rho} \right) dt, \quad (1)$$

где H — толщина льда, мм; λ — теплопроводность льда, Вт/(м·К); Θ — температура замерзания воды, °С; T_0 — температура поверхности льда, °С; F_w — поток тепла от воды, Вт/м²; $L' \rho$ — удельная теплота плавления льда, кДж/кг.

При неизменных λ , L' , ρ интеграл от разности температур $(\Theta - T_0)$ называют «суммой градусо-дней мороза». С ростом толщины льда второе слагаемое подынтегрального выражения уменьшается, это свидетельствует о том, что рост тонкого льда происходит быстрее, чем толстого.

При упрощении выражения (1) получено [8, 15] выражение, показывающее зависимость толщины льда от приповерхностной температуры воздуха:

$$H_t = 3,5 \sqrt{|R|},$$

где H_t — толщина льда, мм; R — сумма градусо-дней мороза, °С.

Прогноз изменения площади морского льда строился на основе зависимости от метеопараметров на акватории Карского моря и с учетом влияния аномалий температуры воды в тропической области Северной Атлантики.

Оценка зависимости между аномалиями от средней температуры поверхности океана в низких широтах Северной Атлантики и площадью морского льда в Карском море включала в себя как оценку корреляционной зависимости между параметрами, так и поиск фазовых сдвигов одного параметра относительно другого. Расчеты проводились по среднемесячным данным температуры поверхности океана, осредненным по области 5–25°с. ш., 60–10°з. д.

В работе использован метод взаимно-корреляционного анализа исходных рядов для оценки максимального коэффициента корреляции между ними и соответствующего сдвига (запаздывания). Данный анализ позволяет определить максимальную корреляционную связь процессов при условии сдвига временных серий друг относительно друга на некоторый временной промежуток — лаг. Взаимная корреляционная функция определяется для двух стационарных временных рядов как коэффициент корреляции между ними в зависимости от лага.

Регрессионные оценки получены методом наименьших квадратов.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПЛОЩАДИ И ТОЛЩИНЫ МОРСКОГО ЛЬДА В КАРСКОМ МОРЕ

В межгодовой изменчивости приповерхностной температуры воздуха, содержания водяного пара и нисходящей длинноволновой радиации по усредненным данным для Карского моря за период с 1979 по 2019 г. присутствуют межгодовые колебания и положительный линейный тренд (рис. 1а). Однако в темпах потепления обнаружена существенная разница, и потому анализ линейного тренда проводился для двух периодов: с 1979 по 2000 г. и с 2000 по 2019 г.

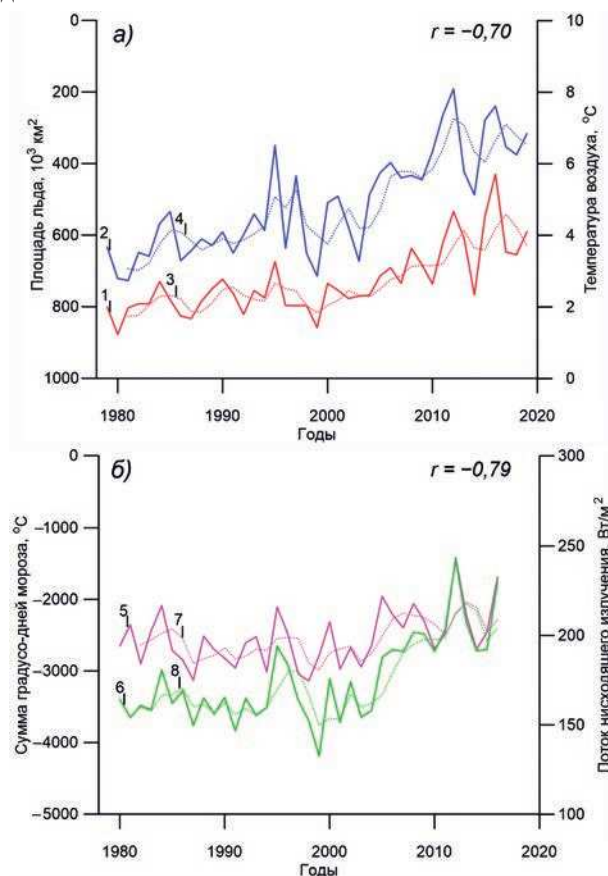


Рис. 1. Межгодовая изменчивость а) приповерхностной температуры воздуха (1) и площади морского льда (2) в Карском море за период июль–август с 1979 по 2019 г. по данным реанализа ERA5; сглаживание по 3 года (3–4); б) суммы градусо-дней мороза (5) и потока нисходящей длинноволновой радиации (6) за ноябрь–апрель в Карском море за 1980–2016 гг. по данным наблюдений и реанализа ERA5; сглаживание по 3 года (7–8); r — коэффициент корреляции после удаления тренда

Fig. 1. Interannual variability of а) surface air temperature (1) and sea ice area (2) in the Kara Sea for the period July–August from 1979 to 2019 according to the ERA5 reanalysis data; smoothing for 3 years (3–4); б) sum of frost degree day (5) and descending long-wave radiation flux (6) in November–April in the Kara Sea for 1980–2016 according to observation and reanalysis data ERA5; smoothing for 3 years (7–8); r — correlation coefficient after trend deleting

Среднегодовая приповерхностная температура воздуха за весь рассматриваемый период с 1979 по 2019 г. возросла в среднем на $4,4 \pm 0,6$ °C: коэффициент линейного тренда до 2000 г. составил 0,02 °C/год и 0,19 °C/год после 2000 г. Наиболее сильный рост температуры воздуха приходится на зимний период, $5,6 \pm 1,1$ °C (–0,06 °C/год до 2000 г. и 0,27 °C/год после 2000 г.), а в летний период — $2,0 \pm 0,3$ °C (+0,02 °C/год до 2000 г. и 0,11 °C/год после 2000 г.). Увеличение темпов потепления с конца XX в. может являться следствием целого ряда факторов. К примеру, в работе [16] обсуждается смена режимов атмосферной циркуляции в Арктике и изменение треков циклонов в сторону Карского моря после 2000 г., что увеличивает приток тепла и, следовательно, приземную температуру воздуха. Алексеев и др. [9] связывают ускорение потепления с увеличением адвекции тепла из низких широт.

Площадь льда в Карском море сократилась за рассматриваемые годы на $209,2 \pm 24,0$ тыс. км² ($-1,9 \cdot 10^3$ км²/год до 2000 г. и $-7,7 \cdot 10^3$ км²/год после 2000 г.) — это 10,5 % от общего сокращения площади льда в Арктике. Сокращение средней площади в зимний период составило $65,5 \pm 10,3$ тыс. км² ($-0,2 \cdot 10^3$ км²/год до 2000 г. и $-3,4 \cdot 10^3$ км²/год после 2000 г.) — 4,3 % от общего сокращения площади льда в Арктике, в летний площадь льда уменьшилась на $385,6 \pm 44,8$ тыс. км² ($-3,7 \cdot 10^3$ км²/год до 2000 г. и $-9,9 \cdot 10^3$ км²/год после 2000 г.) — 12,2 % от летнего сокращения по Арктике.

Содержание водяного пара играет важную роль в зимнем потеплении, увеличивая поток нисходящего излучения, повышая приповерхностную температуру воздуха [12–15] и, следовательно, уменьшая сумму градусо-дней мороза (рис. 1б). Поток нисходящей длинноволновой радиации возрос на $18,2 \pm 2,3$ Вт/м² за весь рассматриваемый период с 1979 по 2019 г., а в зимний период это изменение составило $24,8 \pm 4,9$ Вт/м². До 2000 г. наблюдалось незначительное уменьшение потока на 0,5 Вт/м² в год, а после 2000 г. наблюдался рост на 1,2 Вт/м² в год. Толщина припая

Таблица 1

Коэффициенты корреляции между приповерхностной температурой воздуха и площадью морского льда за период с 1979 по 2019 г. после удаления тренда из данных и сглаживания скользящим средним по 3 года

Table 1

Correlation coefficients between surface air temperature and sea ice area for the period from 1979 to 2019 after removing the trend from the data and smoothing

Параметры/Месяцы	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
Приповерхностная температура воздуха и площадь морского льда	–0,71	–0,57	–0,63	–0,91

Таблица 2

Коэффициенты корреляции между приповерхностной температурой воздуха и площадью морского льда после удаления тренда из данных и сглаживания скользящим средним по 3 года

Table 2

Correlation coefficients after removing the trend from the data and smoothing between surface air temperature and sea ice area

Параметры/Месяцы		6	7	8	9	10
Приповерхностная температура воздуха и площадь морского льда	до 2000 г.	–0,49	–0,69	–0,51	–0,56	–0,92
	после 2000 г.	–0,84	–0,71	–0,65	–0,77	–0,94

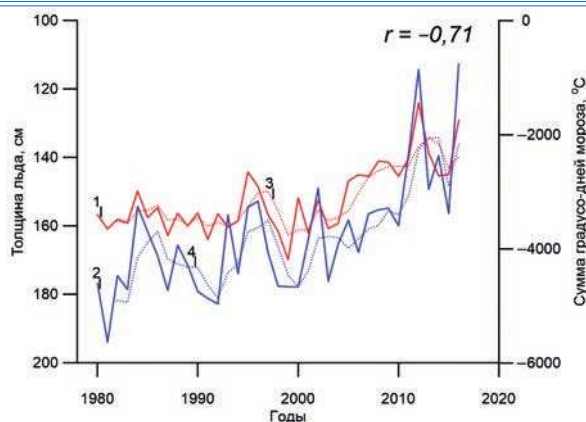


Рис. 2. Межгодовая изменчивость суммы градусо-дней мороза за ноябрь–апрель (1) и максимальной толщины припая (2) в Карском море за период с 1980 по 2016 г. по данным наблюдений за толщиной припая и реанализа ERA5; сглаживание по 3 года (3–4); r — коэффициент корреляции после удаления тренда

Fig. 2. Interannual variability sum of frost degree days (1) and maximum ice thickness (2) in the Kara Sea for the period December–February from 1980 to 2016 according to observations of maximum ice thickness and ERA5 reanalysis; smoothing for 3 years (3–4); r — correlation coefficient after trend deleting

по данным наблюдений на станциях за 37 лет (с 1980 по 2016 г.) уменьшилась на $30,7 \pm 3,9$ см (на 0,4 см/год до 2000 г. и на 2,6 см/год после) (рис. 2).

Связь приповерхностной температуры воздуха и площади морского льда наиболее отчетливо прослеживается с июня по октябрь с корреляцией между ними от $-0,76$ до $-0,89$ и остается значимой после удаления тренда (табл. 1).

Разница в темпах потепления очевидна, и потому периоды с 1979 по 2000 г. и с 2000 по 2019 г. были рассмотрены при анализе корреляционной зависимости по отдельности (табл. 2).

Связь толщины припая и сумм градусо-дней мороза отражена на рис. 2. Отметим, что средние по акватории Карского моря суммы градусо-дней мороза, рассчитанные по данным реанализа ERA5, показали хорошую согласованность $r = 0,72$ после удаления тренда с натурными данными прибрежных метеорологических станций (м. Стерлегова, м. Голомянный, о. Белый, о. Визе, Марресале, Диксон). Однако систематическое расхождение между суммами градусо-дней мороза по реанализу и по данным наблюдений на станциях составило около 1000 градусо-дней. Причина в том, что ячейки сетки ERA5 включают не только метеостанции, но и прилегающую акваторию Карского моря, которая в целом теплее побережья. Низко- и высокочастотная изменчивость данных реанализа и данных наблюдений совпадают. Поэтому корреляция после удаления тренда между суммами градусо-дней мороза и толщинами льда по наблюдениям на станциях составляет $-0,75$, а с ERA5 — $-0,80$.

ВЛИЯНИЕ НИЗКИХ ШИРОТ НА КЛИМАТ И ЛЕД В КАРСКОМ МОРЕ

Влияние температуры поверхности океана в низких широтах Северной Атлантики на климатические характеристики в Баренцевом море [17] и в Арктике [18, 19] позволяет сделать предположение о распространении этого влияния также и на регион Карского моря.

В результате расчетов кросс-корреляции была выделена зависимость между аномалиями температуры поверхности океана в тропической части Северной Ат-

**Коэффициенты корреляции площади морского льда в летние месяцы
в Карском море и аномалий температуры поверхности океана
в тропической области Северной Атлантики в осенние месяцы**

Table 3

**Correlation coefficients of sea ice area in summer months
in the Kara Sea and ocean surface temperature anomalies
in the tropical region of the North Atlantic in autumn months**

Месяцы	Июнь	Июль	Август
Сентябрь	–0,34 (30)	–0,55 (31)	–0,47 (32)
Октябрь	–0,44 (31)	–0,69 (32)	–0,64 (33)
Ноябрь	–0,33 (32)	–0,55 (33)	–0,52 (34)

Примечание. В скобках приведено запаздывание отклика в месяцах.

Note. The response lag, in months, is given in brackets.

лантики (область 5–25° с. ш., 60–10° з. д.) в осенние месяцы и площадью льда в Карском море в летние месяцы (табл. 3).

Максимальный лаг, то есть время запаздывания отклика аномалий площади морского льда в Карском море на изменения температуры поверхности океана в тропической части Северной Атлантики, составляет 30–34 месяца между температурой поверхности океана в октябре и площадью морского льда в июне–августе.

Полученный результат хорошо согласуется с выводами статьи [10] о времени запаздывания отклика площади льда в Баренцевом море, составляющем 27–32 месяца между аномалиями температуры поверхности океана в октябре и льдом в январе–июне.

При учете обнаруженного запаздывания отклика и удалении шума сглаживанием рядов по 3 года аномалии температуры поверхности океана в низких широтах обнаруживают согласованность низкочастотных колебаний с аномалиями площади льда в Карском море в июле (рис. 3).

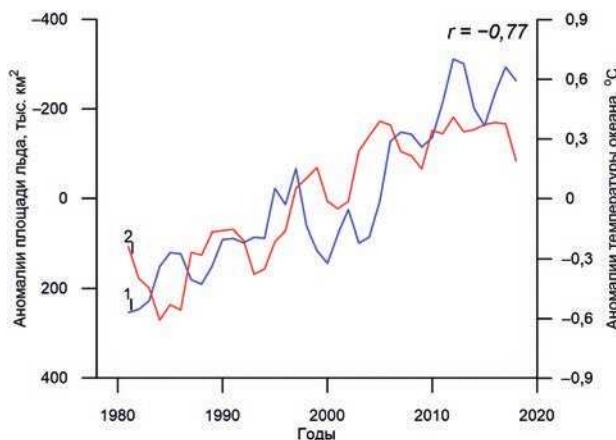


Рис. 3. Площадь морского льда в Карском море в июле (1) и температура поверхности океана тропической области Северной Атлантики в октябре (2), с учетом запаздывания сигнала $\tau = 32$ месяца и сглаживания

Fig. 3. Ocean surface temperature of the tropical region of the North Atlantic in October (red) and the sea ice area in the Kara Sea in July (blue), taking into account the signal delay $\tau = 32$ months and smoothing

МОДЕЛИ ПРОГНОЗА ПЛОЩАДИ ЛЬДА КАРСКОГО МОРЯ НА ОСНОВЕ СВЯЗИ С ХАРАКТЕРИСТИКАМИ КЛИМАТА

Выше было показано, что суммы градусо-дней мороза являются определяющим фактором для толщины льда в зимний период. Однако они опосредованно влияют также и на его площадь: при меньшей толщине льда летнее сокращение его площади будет происходить стремительнее при прочих равных условиях. Так, суммы градусо-дней мороза за ноябрь–апрель и площади льда в августе связаны в 1980–2016 гг. коэффициентом корреляции $-0,76$ после сглаживания и удаления тренда, что позволяет построить регрессионную зависимость между суммами градусо-дней мороза и площадью льда в августе в Карском море. Полученная зависимость позволяет прогнозировать площадь морского льда с заблаговременностью 3 месяца:

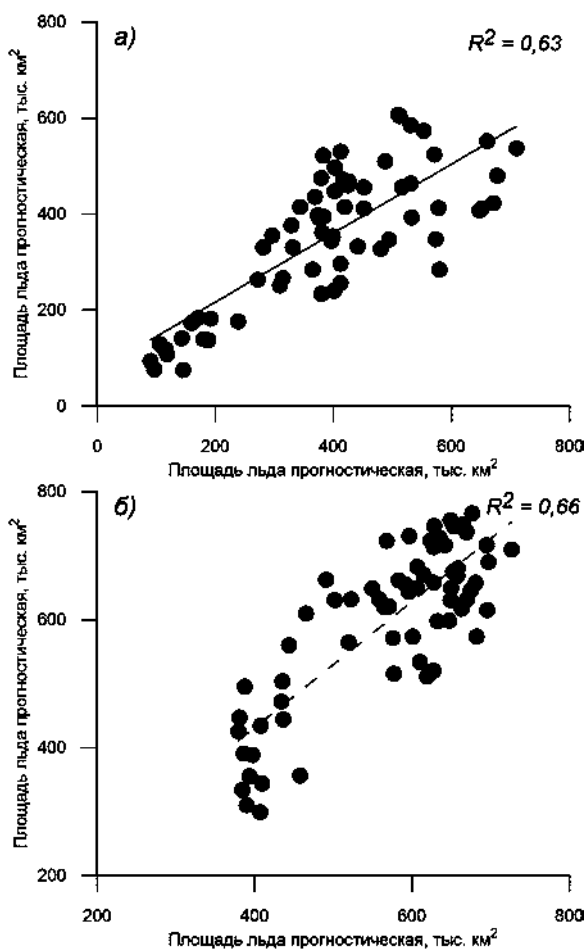


Рис. 4. Сравнение результатов моделирования на основе а) сумм градусо-дней мороза; б) аномалий температуры поверхности океан в низких широтах; R^2 — коэффициент детерминации
Fig. 4. Comparison of simulation results based on а) sums of frost degree-days; б) ocean surface temperature anomalies at low latitudes; R^2 is the coefficient of determination

$$\text{ПМЛ}_{\text{VIII}} = 1.641 \cdot 10^{-12} \cdot \text{СГДМ}_{\text{XI-IV}}^{4,006},$$

где ПМЛ_{VIII} — площадь морского льда в августе, тыс. км²; $\text{СГДМ}_{\text{XI-IV}}$ — сумма градусо-дней мороза за период с ноября по апрель, °С.

Учитывая показанное выше влияние аномалий температуры поверхности океана в Атлантике на климатические условия в Карском море, можно повысить заблаговременность прогноза площади морского льда до 3 лет:

$$\text{ПМЛ}_{\text{VII}} = -361,12 \cdot \text{АТПО},$$

где ПМЛ_{VII} — аномалия от средней площади морского льда в июле в Карском море, тыс. км²; АТПО — аномалии от средней температуры поверхности океана в тропической области Северной Атлантики в октябре, °С.

Для оценки качества представленных моделей был использован доступный архив данных площади морского льда в Карском море с 1950 г. по настоящее время (рис. 4).

Средняя оценка качества долгосрочных прогнозов рассчитывалась по критерию оправдываемости, который определяется ошибкой прогноза и среднеквадратическим отклонением фактической площади морского льда. Метод предполагает сравнение каждого полученного значения по модели с каждым фактическим значением, после чего разница сравнивается с критерием оправдываемости и, если ошибка менее этого критерия, то значению присваивается 100 %, если более, то 0 % [20, с. 114]. Средняя оценка качества прогноза площади морского льда в августе по суммам градусо-дней мороза составила 80 %, по температуре поверхности океана в тропической области Северной Атлантики — 80 %.

ВЫВОДЫ

В работе приведены оценки изменения климатических и ледовых условий Карского моря, а также получены количественные оценки влияния метеорологических параметров на ледовые условия.

Влияние изменений климата на толщину и площадь льда Карского моря проявляется в периоды нарастания и таяния морского льда, которые во многом определяются температурным режимом. В летний период таяние морского льда в значительной степени обусловлено изменениями приповерхностной температуры воздуха (коэффициент корреляции от –0,57 до –0,91). В зимний период толщина льда зависит от сумм градусо-дней мороза ($r = -0,80$). Температурный режим в свою очередь определяется радиационным балансом, а именно изменчивостью в длинноволновом потоке за счет увеличения содержания водяного пара.

Установлено удаленное влияние аномалий температуры поверхности океана в тропической области Северной Атлантики на площадь льда Карского моря. При этом реакция площади льда в июле–августе отстает на 30–34 месяца от соответствующих аномалий температуры поверхности океана в сентябре–ноябре.

Построены регрессионные модели зависимости летней площади морского льда от зимней суммы градусо-дней мороза и аномалий температуры поверхности океана в низких широтах. Модель зависимости площади морского льда в августе в Карском море от сумм градусо-дней мороза в ноябре–апреле позволяет воспроизводить низкочастотную изменчивость с заблаговременностью 3 месяца. Модель зависимости площади морского льда в июле в Карском море от аномалий температуры поверхности океана в низких широтах в октябре позволяет воспроизводить низкочастотную изменчивость с заблаговременностью 32 месяца. Обе модели являются эффективными и статистически значимыми.

Конфликт интересов. Конфликт интересов отсутствует.

Финансирование. Исследование выполнено при поддержке РФФИ по проектам 18-05-00334, 18-05-60107.

Благодарности. Автор признательна А.В. Юлину и Е.А. Павловой (отдел ледовых прогнозов ФГБУ «ААНИИ») за предоставленные данные по толщине припая.

Competing interests. The author has no competing interests.

Funding. The article was supported by the Russian Foundation for Basic Research (grants 18-05-00334, 18-05-60107).

Acknowledgments. The author is grateful to A.V. Yulin and E. A. Pavlova (State Scientific Center “AARI”, Ice Forecasting Department) for the data provided on fast ice thickness.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Специальный отчет IPCC об океане и атмосфере в изменяющемся климате. URL: <https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/chapter-3-2/> (дата обращения 05.03.2022).
2. Алексеев Г.В., Кузьмина 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.
3. Stroeve J., Notz D. Changing state of Arctic sea ice across all seasons // Environmental Research Letters. 2018. V. 13. № 10. P. 103001.
4. Lindsay R., Schweiger A. Arctic sea ice thickness loss determined using subsurface, aircraft, and satellite observations // Cryosphere. 2015. V. 9. № 1. P. 269–283.
5. 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.
6. Polyakov I.V., Alekseev G.V., Bekryaev R.V., Bhatt U.S., Colony R., Johnson M.A., Yulin A.V. Long-term ice variability in Arctic marginal seas // Journal of Climate. 2003. V. 16. № 12. P. 2078–2085.
7. Захаров В.Ф., Малинин В.Н. Морские льды и климат. СПб.: Гидрометеиздат, 2000. 92 с.
8. Визе В.Ю. Моря Советской Арктики: Очерки по истории исследования. 2 изд., доп. Л.: Главсевморпуть, 1939. 568 с.
9. Алексеев Г.В., Кузьмина С.И., Уразгильдеева А.В., Бобылев Л.П. Влияние атмосферных переносов тепла и влаги на потепление в Арктике в зимний период // Фундаментальная и прикладная климатология. 2016. Т. 1. С. 43–63.
10. Глок Н.И., Алексеев Г.В., Вязилова А.Е. Сезонный прогноз ледовитости Баренцева моря // Проблемы Арктики и Антарктики. 2019. Т. 65. № 1. С. 5–14.
11. Данные реанализа ERA5. URL: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5> (дата обращения 05.03.2022).
12. Данные по морскому льду. URL: http://wdc.aari.ru/datasets/d0005/txt/kara_all.txt (дата обращения 05.03.2022).
13. Доронин Ю.П., Хейсин Д.Е. Морской лед. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 320 с.
14. Доронин Ю.П., Кубышкин Н.В. Рост и таяние морского льда. СПб.: Гидрометеиздат, 2001. 44 с.
15. Зубов Н.Н. Льды Арктики. М.: Изд. Главсевморпути, 1944. 396 с.
16. Proshutinsky A., Dukhovskoy D., Timmermans M. L., Krishfield R., Bamber J.L. Arctic circulation regimes // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2015. T. 373. № 2052. C. 20140160.

17. Алексеев Г.В., Глок Н.И., Смирнов А.В., Вязилова А.Е. Влияние Северной Атлантики на колебания климата в районе Баренцева моря и их предсказуемость // Метеорология и гидрология. 2016. № 8. С. 38–56.
18. Alekseev G.V., Glok N.I., Vyazilova A.E., Kharlanenkova N.E. Climate change in the Arctic: causes and mechanisms // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing. 2020. V. 606. № 1. P. 012002.
19. Alekseev G.V., Glok N.I., Vyazilova A.E., Kharlanenkova N.E., Kulakov M.Y. Influence of SST in low latitudes on the arctic warming and sea ice // Journal of Marine Science and Engineering. 2021. V. 9. № 10. P. 1145.
20. РД 52.27. 759–2011. Наставление по службе прогнозов, раздел 3, часть III. Служба морских гидрологических прогнозов. М.: ТРИАДА ЛТД, 2011. 188 с.

REFERENCES

1. Special report IPCC on the ocean and cryosphere in the changing climate. Available at: <https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/chapter-3-2/> (accessed 05.03.2022).
2. 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. *Lyod i sneg*. Ice and Snow. 2017, 57 (3): 381–390. [In Russian].
3. Stroeve J., Notz D. Changing state of Arctic sea ice across all seasons. *Environmental Research Letters*. 2018, 13 (10): 103001.
4. Lindsay R., Schweiger A. Arctic sea ice thickness loss determined using subsurface, aircraft, and satellite observations. *Cryosphere*. 2015, 9 (1): 269–283.
5. 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.
6. Polyakov I.V., Alekseev G.V., Bekryaev R.V., Bhatt U.S., Colony R., Johnson M.A., Yulin A.V. Long-term ice variability in Arctic marginal seas. *Journal of Climate*. 2003, 16 (12): 2078–2085.
7. Zakharov V.F., Malinin V.N. *Morskie l'dy i klimat*. Sea ice and climate. St. Petersburg: Gigrometeoizdat, 2000: 92 p. [In Russian].
8. Vize V.Yu. *Morya Sovetskoj Arktiki: Ocherki po istorii issledovaniya*. 2 izd., dop. Seas of the Soviet Arctic: Essays on the History of Research. 2nd ed., Add. Leningrad: Glavsevmorput', 1939: 568 p. [In Russian].
9. Alekseev G.V., Kuzmina S.I., Urazgildeeva A.V., Bobylev L.P. The influence of atmospheric transport of heat and moisture to enhance the warming in the Arctic in winter. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*. Fundamental and Applied Climatology. 2016, 1: 43–63. [In Russian].
10. Glok N.I., Alekseev G.V., Vyazilova A.E. Seasonal forecast of sea ice extent in the Barents Sea. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2019, 65 (1): 5–14. [In Russian].
11. Reanalysis dataset ERA5. Available at: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5> (accessed 05.03.2022).
12. Sea ice dataset. Available at: http://wdc.aari.ru/datasets/d0005/txt/kara_all.txt (accessed 05.03.2022).
13. Doronin Yu.P., Kheisin D.E. *Morskoj led*. Sea ice. Leningrad: Gigrometeoizdat, 1975: 320 p. [In Russian].
14. Doronin Yu.P., Kubyshkin N.V. *Rost i tayanie morskogo l'da*. Growth and melting of sea ice. St. Petersburg: Gigrometeoizdat, 2001: 44 p. [In Russian].
15. Zubov N.N. *L'dy Arktiki*. Arctic ice. Moscow: Ed. Glavsevmorput, 1944: 396 p. [In Russian].

16. Proshutinsky A., Dukhovskoy D., Timmermans M.L., Krishfield R., Bamber J.L. Arctic circulation regimes. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2015, 373 (2052): 20140160.
17. Alekseev G.V., Glock N.I., Smirnov A.V., Vyazilova A.E. The influence of the North Atlantic on climate variations in the Barents Sea and their predictability. *Meteorologiya i gidrologiya. Meteorology and hydrology*. 2016, 8: 38–56. [In Russian].
18. Alekseev G.V., Glok N.I., Vyazilova A.E., Kharlanenkova N.E. Climate change in the Arctic: causes and mechanisms. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2020, 606 (1): 012002.
19. Alekseev G.V., Glok N.I., Vyazilova A.E., Kharlanenkova N.E., Kulakov M.Y. Influence of SST in low latitudes on the arctic warming and sea ice. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021, 9 (10): 1145.
20. GD 52.27. 759–2011 *Nastavlenie po sluzhbe prognozov, razdel 3, chast' III, Sluzhba morskikh gidrologicheskikh prognozov*. Forecast Service Manual, Section 3, Part III, Marine Hydrological Forecast Service. Moscow: TRIADA LTD, 2011: 188 p. [In Russian].

СТРАНИЦЫ ИСТОРИИ
PAGES OF HISTORY

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-1-76-86>

УДК 930.253(98)



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

**Expedition diary — insights into the history of organizing
and conducting Russian Arctic expeditions in the early XXth century**

Olga V. Shabalina, Ksenia S. Kazakova*

Barents Centre of the Humanities – Branch of the Federal Research Centre

«Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences», Apatity, Murmansk region, Russia

**oshabalina@yandex.ru*

Summary

The collections belonging to the Museum-Archive of the history of study and development of the European North of the Barents Center of the Humanities — Branch of the Federal Research Center «Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences» (BCH KSC RAS), contain several handwritten diaries by members of Arctic expeditions organized in the first half of the XXth century. The article discusses the value of the expedition diary of a member of a Russian Arctic expedition to Dikson Island (1916), the hydrometeorologist Innokenty Tikhomirov (1890–1955), as a possible source of data on the history of organizing and conducting scientific research in the Arctic. Based on the data presented in the diary, the paper reconstructs the progress of work on the organization of the northernmost meteorological station on Dikson Island in 1916.

Keywords: Arctic expeditions, diary, Dikson Island, I.K. Tikhomirov meteorological station, historical sources.

For Citation: *Shabalina O.V., Kazakova K.S. Expedition diary — insights into the history of organizing and conducting Russian Arctic expeditions in the early XXth century. Problemy Arktiki i Antarktiki. Arctic and Antarctic Research. 2022, 68 (1): 76–86. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-1-76-86>.*

Received 19.02.2022

Revised 09.03.2022

Accepted 14.03.2022

INTRODUCTION

The source base for the history of the development and study of the Russian Arctic includes published materials and unpublished documents stored in departmental, regional or central state archives and museums of the Russian Federation [1]. A separate group includes materials that came from private individuals: memoirs, diaries, letters. A diary as an auto-communicative source (or an ego source, as it is called in modern source studies) [2] is intended for long-term storage from the moment it is created. The author regularly takes handwritten notes on what happened to them and the people around them, creating markers that would be useful for the analysis and assessment of the past reproduced. The unity of a diary's form is maintained by its structure — everyday writing with the date, and in the case of a travel diary also the place of events, fixed [3, 4].

According to the famous researcher A. Predtechensky, the diary as a historical source is, as it were, a very human document, part of the author's life. The researcher argued

that the author cannot have any preconceived ideas or even plan, because he or she does not obey the immanent laws of artistic creation, but follows his or her life [5]. Diaries register the results of personal perceptions of reality, filtered through the author's memory, reflecting the author's personal experience, as well as social and communicative ties, encoded in various signs, words, signals, etc. [4, 6].

Travel diaries give a fairly complete picture of the author's route, present their travel impressions, describe the landscapes and cultural environment of the time, subsequently often irretrievably lost under the pressure of civilization [7, 8].

In the collection belonging to the Museum-Archive of the history of study and development of the European North of the Barents Center of the Humanities — Branch of the Federal Research Center «Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences» (BCH KSC RAS), there are several handwritten diaries whose authors participated in Arctic expeditions in the first half of the XXth century. The collection includes the following diaries: the diary of the geologist Maria Lavrova, from expeditions to Novaya Zemlya in 1921 and to the Kola Peninsula in 1920, 1934; that of the oceanologist, geographer and geomorphologist Victor Kalyanov, an expedition to Wrangel Island in 1929; the diary of the hydrometeorologist Innokenty Tikhomirov — an expedition to Dikson Island in 1916. Victor Kalyanov's diary and two of the three diaries of Maria Lavrova are classified by their authors as field diaries and contain information about the field and focus of professional interest of each of these researchers with reference to the place and time of the expedition but extremely small amount of detail concerning matters unrelated directly to the process of research. However, one diary belonging to Maria Lavrova and Innokenty Tikhomirov's diary are travel diaries and are rich in detail of everyday expeditionary life, ethnographic descriptions and other evidence (Fig. 1, 2).

The travel diary of Maria Lavrova from the 1920 expedition to the Murmansk coast of the Kola Peninsula, which was part of the geological party of the Northern Field



Fig. 1. Maria Alekseevna Lavrova (1887 — after 1969). 1930s. The Museum-Archive of the BCH KSC RAS. Main Collection (MC) 311

Рис. 1. Мария Алексеевна Лаврова (1887 — после 1969). 1930-е гг. Музей-архив ЦГП КНЦ РАН. Основной фонд (ОФ) 311



Fig. 2. Photo from an expedition to Novaya Zemlya, 1921. The Museum-Archive of the BCH KSC RAS. Supplementary Collection (SC) 819

Рис. 2. Фото из экспедиции на Новую Землю, 1921. Музей-архив ЦГП КНЦ РАН. Научно-вспомогательный фонд (НВФ) 819

Expedition headed by Professor P.V. Wittenburg, contains mainly non-verbal recording of the expeditionary events: a lot of monochrome pencil drawings with signatures and scarce comments. In the comments, the author supplements the visual information with a description of her emotional state, the sounds heard, and the color palette of particular places seen on the expedition route. For example, describing the Kola Bay one day, Maria Lavrova writes about a blue distance with green and purple hues and light gray water. And on a foggy September morning at the mouth of the Tuloma River, everything had gentle outlines and pastel colors, while the distance was of the grayish-blue, against which objects stood out clearly. At high tide, the songs of fisher women were heard on the banks of the Kola River, and everything was of soft bluish-grayish color, because the fog had not cleared yet. On a beautiful evening at the pier, children played and sang songs. It was quiet and peaceful. The sea breeze blew from the bay, and the author felt good [9].

Innokenty Tikhomirov's travel diary contains unique information on the history of the setting up of an Arctic radio station in 1916, to conduct meteorological and hydrological observations on Dikson Island. On June 25, 1916, the expedition left Krasnoyarsk on the steamer *Lena* to equip an observation station on Dikson Island. One of the members of this expedition was Innokenty Tikhomirov (1890–1955), who described its progress in his diary "Assignment Expedition to Dikson Island. June — October / 1916" [10]. Back in 1914, the main task of the Hydrographic Expedition for the Exploration of the Arctic Ocean as specified by the Maritime Ministry of Russia was for the expedition ships to make a passage from Vladivostok to Murman. A network of Kara radio stations, set up and equipped during 1913–1914, was to contribute to the successful completion of this operation [11, p. 424–425]. By August 26, 1915, the General Hydrographic Directorate had finally completed the equipment of the radio station and the expedition's wintering grounds on Dikson Island. The decision to close the Arctic radio station was made after the expedition ships had returned to Arkhangelsk. Although the station could be used further by the General Directorate of Posts and Telegraphs, the proposal made by the Maritime Ministry that it be used was rejected. The importance of using the station on Dikson Island was emphasized in a special letter sent from the Academy of Sciences and the Managing Director of the Siberian Joint Stock Company of Shipping, Industry and Trade I.I. Lid to the Council of Ministers. After considering the issue at the government level, it was decided to continue using the station. Moreover, additional funds were allocated for the purchase of new equipment [11, p. 428].

During the expedition to Dikson Island, Innokenty Tikhomirov met a veterinary surgeon and collegiate assessor Pavel Kushakov (1881–1946), known as the deputy of the head of the Russian 1912–1914 expedition to the North Pole Georgiy Sedov (Fig. 3). After returning from the expedition, it was Pavel Kushakov who was placed in charge of setting up the wintering and radio station on Dikson Island in 1915 [12], and resuscitating this radio station in 1916. Collection No. 75 of the Polar Commission of the Academy of Sciences of the USSR, the St. Petersburg Branch of the Federal State Government-financed Institution of Science of the Archive of Russian Academy of sciences (SPbB ARAS) contains diary notes of Pavel Kushakov from the expedition of 1912–1914 [13–16] and those related to the wintering on Dikson Island in 1915 [17, 18]. There exist diametrically opposed opinions and evidence about the personality and activities of this person. Nikolai Pinegin (1883–1940), a closest associate of G. Sedov on his polar expedition, had an extremely negative opinion of him. Conversely, Innokenty Tikhomirov's diary contains



Fig. 3. Members of the expedition to the North Pole (sitting on chairs), from left to right: V.Yu. Wiese, G.Ya. Sedov, P.G. Kushakov, M.A. Pavlov. 1912. The Museum-Archive of the BCH KSC RAS. BC 289

Рис. 3. Члены экспедиции на Северный полюс (сидят на стульях): В.Ю. Визе, Г.Я. Седов, П.Г. Кушаков, М.А. Павлов. 1912. Музей-архив ЦГП КНЦ РАН. ОФ 289

both direct positive evaluation of the activities of Pavel Kushakov as head of the 1915 expedition and evidence that, in our opinion, indirectly testifies to his negligence.

The aim of the research is to examine the diary of a member of the Russian expedition to Dikson Island (1916), hydrometeorologist and climatologist Innokenty Tikhomirov (1890–1955), as a potential source of historical data on organizing and conducting research in the Arctic.

I.K. TIKHOMIROV'S TRAVEL DIARY

The author of the diary containing information about the running and organization of the expedition to Dikson Island in 1916, Innokenty Tikhomirov was born on July 1, 1890 into the family of an archpriest in Irkutsk, where in 1908 he graduated with a silver medal from an Irkutsk provincial school and in the same year entered the Mathematics Department of the Physics and Mathematics Faculty of St. Petersburg University. He graduated from the university as “meteorologist” (1913) and “astronomer” (1915).

On October 1, 1913, he began work at the General Hydrographic Directorate of the Maritime Ministry as a full-position employee for the hydrometeorological unit. In 1914 Innokenty Tikhomirov was elected full member of the Russian Astronomical Society, and in 1916 — full member of the Russian Geographical Society (Fig. 4).

In the summer of 1916, the General Hydrographic Directorate sent the young specialist to the mouth of the Yenisei River on Dikson Island (73° 30' N) to equip a hydrometeorological station there and organize hydrological, meteorological and aerological observations. At that time, the station was to become the northernmost meteorological station in Russia.



Fig. 4. I.K. Tikhomirov (1890–1955). The Museum-Archive of the BCH KSC RAS. SSC 947

Рис. 4. И.К. Тихомиров (1890–1955). Музей-Архив ЦГП КНЦ РАН. НВФ 947

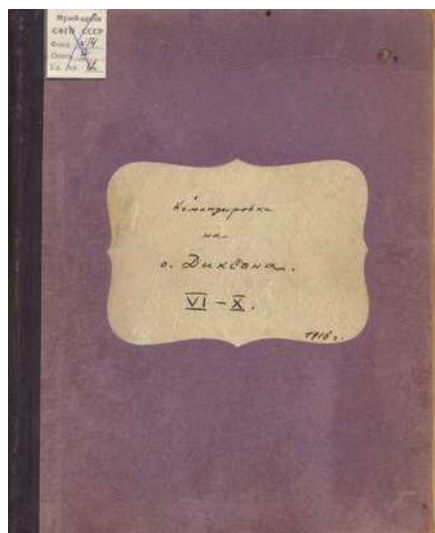


Fig. 5. Innokenty Tikhomirov's diary "Assignment to Dikson Island. June – October, 1916". Manuscript cover. Museum-Archive of the BCH KSC RAS. SSC 945

Рис. 5. Дневник И.К. Тихомирова «Командировка на о. Диксона. VI–X/1916». Обложка рукописи. Музей-Архив ЦГП КНЦ РАН. НВФ 945

The archival document which is the focus of this study is the travel diary "Assignment Expedition to Dikson Island. June — October / 1916" (Fig. 5, 6), which Innokenty Tikhomirov began on June 19, 1916, just before he was 26, after the first day of his stay in Krasnoyarsk, where the expedition was to start. From 19 to 25 June, taking advantage of a hitch in the start of the expedition, he explored the outskirts of the city. On June 25, at 4 o'clock in the afternoon, a public prayer was given on the steamer Lena and at 6 o'clock in the evening they departed from the pier together with the lighter Correspondent [10, p. 1 back]. Innokenty Tikhomirov spent his time enjoying the views from the deck of the ship and recording his impressions. On June 27–28 Lena arrived in Yeniseisk. The author of the diary visited the Spassky Monastery and a museum. At noon on June 29, the voyage continued.

From June 30, ethnographic observations begin to appear in Innokenty Tikhomirov's records. For example, he notes the specific features of the dialect of the peasants, who live exclusively by fishing and

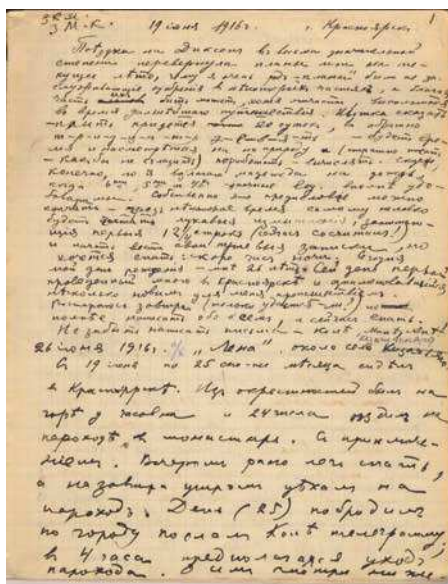


Fig. 6. Innokenty Tikhomirov's diary "Assignment to Dikson Island. June – October, 1916". First page of text. Museum-Archive of the BCH KSC RAS. SSC 945

Рис. 6. Дневник И.К. Тихомирова «Командировка на о. Диксона. VI–X/1916». Первая страница текста. Музей-Архив ЦГП КНЦ РАН. НВФ 945

do not grow grain at all; also, that there are many young people in all the villages since there is no compulsory military service in the Turukhansk region [10, p. 3–4 back].

On his way, Innokenty Tikhomirov inspected meteorological stations, carried out equipment maintenance, and described that and the employees in his diary. As he approached the Arctic Circle, the researcher recorded changes in the landscape and vegetation. On July 3, Lena arrived in Turukhansk, where the instruments of the local meteorological station were checked. Then Innokenty visited the monastery [10, p. 4 back–6].

On July 5, already within the Arctic Circle, the young naturalist — the author of the diary — made it his duty to “collect samples of the local flora” [10, p. 7–9].

From July 14, along with descriptive notes, the author’s evaluative judgments begin to appear in the diary, for example, about the activities of the head of the expedition Pavel Kushakov: “We have a true menagerie with us on Lena... One cannot help being astonished by the foresight of P.G.K. — he might be a landlord or a landowner” [10, p. 14]. Further in the text he is referred to as “doctor” or “Dr”.

The author of the diary meticulously describes the events that unfolded as they approached the island. On July 17, ice floes appeared on the horizon for the first time. There were “only 35 versts” left to get to Dikson, that is, about 2 hours’ walk, but after the Ephraim stone there was solid ice, so we had to turn back. We stopped at Slobodskaya Bay, where we would have to stay on the coast and live in a tent if we failed to get through to Dikson. The young traveler did not find this prospect attractive.

On July 18, due to dense fog, Lena was unable to move further and ran aground. The next day, July 19, the ice had already drifted away significantly, and everyone who was not busy with work crowded on the bridge to watch the mast appear on Dikson. Innokenty Tikhomirov really wanted to see it — “after all, the success or failure of the whole business depended on this”. Finally, he was the first to glimpse it from the middle of Ephraim Bay. It was a solemn moment. Dikson’s outline was already visible in the distance. Maneuvering between the ice floes, Lena passed across the bay, which lies immediately behind Cape Isachenko, and turned to the shore of the next one, which turned out to be convenient for going ashore. The ship anchored and unloading began [10, p. 22–23 back].

In this bay, Innokenty Tikhomirov stayed with members of the expedition N.N. Kozmin, A.P. Golubkov (senior radiotelegraph operator), A.K. Yakovlev (senior mechanic in charge of the radio) and others to organize a temporary expedition camp, where travelers had to wait for the ice at Dikson Island to open. On July 20, work began in the camp. Pavel Kushakov “decided to build winter quarters”. The unloading of the remaining materials and equipment from Lena continued until midnight. Then everyone “cordially said goodbye to everyone”, admired the midnight sun all together (the author of the diary did that for the first time in his life) and Lena left, leaving the members of the expedition to literally sit by the sea and wait for the weather to improve. The construction of the camp continued on July 21st. Innokenty Tikhomirov, Pavel Kushakov and the motorman and sailor F.Ya. Tselm conducted reconnaissance of the sea near Dikson Island on a motor boat. “But on the way they decided to hunt: they managed to kill a deer and a polar bear. After that it was too late to go to Dikson, and indeed it was impossible: the entire strait between Verne Island and Dikson Island was covered with ice” [10, p. 25–26 back].

On July 22, a second reconnaissance attempt was made. Innokenty Tikhomirov spent this day hunting, as well as the next three. On July 25, in the course of a third reconnaissance operation, they almost managed to reach Dikson — just about 50 fathoms

were left. On a warm day of July 27, attempts to get to the island were renewed. P.G. Kushakov, F.Ya. Tselm, A.K. Yakovlev and I.K. Tikhomirov did not get into Dikson Bay itself because of the ice, which also covered the Vega, Lena and Provenin straits. They had to land on the South shore, 3–4 versts away from the station. At 6 PM Innokenty Tikhomirov was the first to set foot on the shores of Dikson. “The radio station was in a perfect working condition. To get inside the station building, the members of the expedition had to break the locks and struggle with the swollen doors. Once in, they had tea and slept overnight on reindeer skins”. All in all, the sailing to Dikson Island had taken 32 days instead of 20, as originally planned. On July 28, the reconnaissance group returned to the temporary camp, and the weather deteriorated — a storm began, which continued the next day. Strong winds and rain did not stop until August 3. On August 2, the construction of the winter quarters was completed [10, p. 27–28].

The source under consideration contains further records, testifying, in our opinion, to the negligence of the head of the expedition Pavel Kushakov, who did not properly organize and did not control the delivery of research equipment and food to the radio station as well as to the wintering place. On August 4, Innokenty Tikhomirov and a party of the expedition’s members went to Dikson, taking food, tools, and devices with them. Between Verne Island and Dikson Island waves practically flooded the boat and washed away the boxes with cargo, including instrumental equipment. The days from 5 August to 8 August are described by the author of the diary as days of “idleness”: “All the instruments which did not sink are in the camp. It is impossible to make observations with an actinometer — the sky is overcast (besides, the wind is harsh). I don’t know if Assman’s psychrometer survived — without it, the expedition is headed for a dismal failure. I remember that it was in another box” [10, p. 28 back–32 back].

On August 9 and 10, “sorties” for instruments were made to the camp by Innokenty Tikhomirov and others. The boat was dangerously overloaded, and the load was such that the loss of it would have meant “the failure of the whole affair”. On August 10, it was not possible to return to Dikson due to the weather. A storm began at night. The party stayed in the winter quarters. On August 11, Innokenty began to train the team of the future meteorological radio station to process pilot balloon observations. Only on August 14 were they able to leave the camp. The load taken was again crucial: almost all the remaining meteorological instruments. “It would be extremely sad to have them sunk”. Innokenty Tikhomirov was eager to get to Dikson as soon as possible: he was driven not only by the desire to deliver the instruments as quickly as possible. On Dikson, during his four-day absence, they should have already installed a radio station, and, consequently, received news about the events on the fronts of the First World War [10, p. 32 back–34 back].

Between August 15 and August 19, Innokenty Tikhomirov sorted out the instruments and tuned the meteorological instruments. For the first time in his life, he heard the working of the radio telegraph, began urgent observations and collection of plants on Dikson. On August 20–25, work continued on equipping the meteorological station and training the expedition members, who later stayed at the station for the winter of 1916–1917, to maintain the instruments. Further, until September 4, the diary contains scanty descriptions of the daily routine of organizing and conducting meteorological observations and the continuing training of the personnel [10, p. 35–39 back].

On September 4, Lena arrived with the missing meteorological instruments. On this day Innokenty Tikhomirov wrote in his diary: “Tomorrow I am leaving Dikson... I have

done all I could, so what happens in the winter (in terms of observations) — only the future will show” [10, p. 40]. On September 5, Innokenty got up early: he needed to sort out the boxes of tools and install them, arrange his affairs and put his things together. In the end Pavel Kushakov gave him a decent dinner with wine. Saying goodbye to everyone, Innokenty left the shores of Dikson. When Lena set sail and was giving farewell whistles, the “Diksonites” answered her by ringing a bell. Innokenty Tikhomirov’s heart could not help but ache when he was looking at the 8 comrades whom he was leaving behind for the winter. After all, wintering on Dikson, as he rightly believed, was not an easy task [10, p. 41 back–42].

On September 15, Innokenty crossed the Arctic Circle, and on September 16, he was a guest at the meteorological station in Turukhansk. The further Lena moved away from Dikson Island, the more laconic the entries in the diary became. And now they contained more descriptions of the technical aspects of navigation on the ships of the Yenisei shipping company, which all delayed Innokenty Tikhomirov’s return to Petrograd [10, p. 46–46 back, 54]. Ethnographic observations are also occasionally found.

On October 2, they arrived in Yeniseisk, where on the evening of October 3 Innokenty Tikhomirov moved to Irtysh and set off for Krasnoyarsk. On October 5, the author noted in his diary that it was exactly a month since he had been sailing down the Yenisei [10, p. 56–58, 60].

The travel diary ends with an afterword, where the author described the joy of finding the blessings of civilization on the “Mainland” and summarized the experience gained during the expedition to Dikson Island: he had had a chance to see the polar areas with their flora and inhabitants, polar ice, the northern lights, the Arctic Ocean, to sail 2,690 versts (one way) along one of the greatest rivers in the world, to observe how people of different nationalities lived and worked in this region, to experience the strongest sensations, to know the diversity of human characters, to improve his skills in meteorology, to hunt, etc. I.K. Tikhomirov considered that all this was worth the “minor inconveniences and hardships” that he had had to endure [10, p. 61–61 back].

CONCLUSION

In 1916, various scientific observations began at the Dikson hydrometeorological radio station, which marked the beginning of regular delivery of meteorological data to the “weather forecasting service” at the Nikolaev Main Physical Observatory. The setting up of the station on the island was brought about “by the need to keep track of the atmospheric conditions in the eastern part of the Kara Sea, which, as research shows, is located near one of the important centers of atmospheric activity” [19]. In addition, the initial period of operation of the Dikson station showed that it contributed a lot to organizing the maintenance of navigation to the mouth of the Yenisei. The success of this enterprise depended a lot on the work of a young specialist — meteorologist and hydrologist Innokenty Tikhomirov, who set up special equipment at the station and trained the radio operators to collect data from observation devices. His contribution to the organization of the northernmost meteorological station on Dikson Island in 1916 is not discussed in previously published works on this topic. This contribution has been identified based on a private document, Innokenty Tikhomirov’s travel diary, and the course of the expedition can now be described retrospectively and in detail. The informative capacity of such a source is of undoubted interest to a wide range of specialists.

Competing interests. The author has no competing interests.

Funding. The financial support of the study was provided from the federal budget within the state task of the KSC RAS on research topic No. FMEZ-2022-0028.

Конфликт интересов. Конфликт интересов отсутствует.

Финансирование. Финансовое обеспечение исследования осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания ФИЦ КНЦ РАН по теме НИР № FMEZ-2022-0028.

REFERENCES

1. Ivanova M.V, Kazakova K.S, Shabalina O.V. Experience of socio-economic and cultural development of the Arctic zone of the Russian Federation in the 19th — the early 20th cent.: considering the source base of the study. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN*. Transactions of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences. 2017, 8 (9–12): 61–76. [In Russian].
2. Rumyantseva M.F. Ego-history and ego-sources: the interrelation of concepts. *Istoriia v ego-dokumentakh: Issledovaniia i istochniki*. History in ego-documents: Research and sources. Yekaterinburg: Publishing house “AsPuR”, 2014: 32–40. [In Russian].
3. Zhzhikhshvili S.V. Diary. *Literaturnaia entsiklopediia terminov i poniatii*. Literary encyclopedia of terms and concepts. Moscow, 2001: 232. [In Russian].
4. Kodan S.V. Sources of private origin: concept, place and role in the study of the history of state-legal phenomena. *Genesis: istoricheskie issledovaniia*. Genesis: historical research. 2014, 3: 60–93. doi: 10.7256/2306-420X.2014.3.11431. [In Russian].
5. Predtechensky A.V. Pushkin's diary 1833–1834. *Pushkin: Issledovaniia i materialy*. Pushkin: Research and Materials. Moscow; Leningrad: Publishing house of the Academy of Sciences of the USSR, 1962, 4: 267–277. [In Russian].
6. Pushkarev L.N. *Klassifikatsiia russkikh pis'mennykh istochnikov po otechestvennoi istorii*. Classification of Russian written sources in national history. Moscow: Nauka, 1975: 281 p. [In Russian].
7. Lantz B. Ice drift during the 1897 Andrée balloon expedition. *Polar Record*. 2019, 55: 385–391. doi: 10.1017/S0032247419000706.
8. Mosselin J., Peret Suedfeld P. Voices from the ice. *Diaries of Polar Explorers*. Environment and Behavior. 1991, 23 (6): 704–722.
9. Tikhomirov I.K. *Komandirovka na ostrov Diksona. Ijun'-oktjabr' 1916* [Assignment to Dikson Island. June – October, 1916]. *Muzej-Arhiv CGP KNC RAN* (Museum-Archive of the BCH KSC RAS). Supplementary Scientific Collection (SSC) 945. P. 1–61. [In Russian].
10. Lavrova M.A. *Dnevnik raboty geologicheskogo otrjada Severnoj nauchno-promyslovoj jekspedicii pod rukovodstvom professora Vittenburga* (Diary of the work of the geological team of the Northern Scientific and Fishing Expedition led by Professor Wittenburg). *Muzej-Arhiv CGP KNC RAN*. Museum-Archive of the BCH KSC RAS. Main Collection (MC) 314. [In Russian].
11. Glushchenko A.A. *Mesto i rol' radiosviasi v modernizatsii Rossii (1900–1917 gg.)*. Place and role of radio communication in the modernization of Russia (1900–1917). St. Petersburg: VMIRE, 2005: 709 p. [In Russian].
12. *Izvestiia Arkhangel'skogo obshchestva izucheniia russkogo Severa*. News of the Arkhangelsk Society for the study of the Russian North. 1915, 5: 153; 6: 194–196. [In Russian].
13. Kushakov P.G. *Dnevnik vracha jekspedicii Kushakova P.G. so svedenijami iz zhizni jekspedicii. 1914* (Diary of the expedition doctor Pavel Kushakov with information from the expedition life). *Sankt-Peterburgskij filial Arhiva Rossijskoj akademii nauk* (St. Petersburg Branch of the Archive of Russian Academy of sciences (SPbB ARAS)). Collection (Coll.) 75. Aids 6. Folder (Fol.) 4. [In Russian].

14. Kushakov P.G. *Dnevnik vracha jekspedicii Kushakova P.D. s opisaniem snarjazhenija jekspedicii, 1912–1917*. (Diary of the expedition doctor Pavel Kushakov with a description of the expedition equipment). Sankt-Peterburgskij filial Arhiva Rossijskoj akademii nauk (SPbB ARAS). Coll. 75. Aids 6. Fol 5. [In Russian].
15. Kushakov P.G. *Dnevnikovye zapisi Kushakova so svedenijami o rabotah i sostojanii jekspedicii, 1913–1914* (Kushakov's diary with information about the expedition work). Sankt-Peterburgskij filial Arhiva Rossijskoj akademii nauk (SPbB ARAS). Coll. 75. Aids 6. Fol. 24. [In Russian].
16. Kushakov P.G. *Dnevnik Kushakova so svedenijami o rabotah i sostojanii jekspedicii, 1913–1914* (Kushakov's diary with information about the expedition work). Sankt-Peterburgskij filial Arhiva Rossijskoj akademii nauk [SPbB ARAS]. Coll. 75. Aids 6. Fol. 42. [In Russian].
17. Kushakov P.G. *Dnevnik nachal'nika radiostancii na ostrove Dikson P.G. Kushakova so svedenijami o provedennoj poljarnoj zimovke, 1915* (Diary of the head of the radio station on the Dikson Island P.G. Kushakov with information about the polar wintering). Sankt-Peterburgskij filial Arhiva Rossijskoj akademii nauk [SPbB ARAS]. Coll. 75. Aids 6. Fol. 43. [In Russian].
18. Kushakov P.G. *Dnevnik P.G. Kushakova so svedenijami o zimovke na ostrove Dikson i zapis'ju prikazov po diksonovskoj radiostancii, 1915* (Diary of P.G. Kushakov with information about wintering on Dikson Island and recording orders on the Dikson radio station). Sankt-Peterburgskij filial Arhiva Rossijskoj akademii nauk [SPbB ARAS]. Coll. 75. Aids 6. Fol. 44. [In Russian].
19. Meteorological station on Dikson Island. *Izvestia Arkhangel'skogo obshchestva izucheniia russkogo Severa* News of the Arkhangelsk Society for the study of the Russian North. 1916, 9: 381. [In Russian].

Экспедиционный дневник как источник по истории организации и проведения российских арктических экспедиций начала XX века

О.В. Шабалина*, К.С. Казакова

Центр гуманитарных проблем Баренц региона —
филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр
Российской академии наук», г. Апатиты, Россия

*oshabalina@yandex.ru

Резюме

В фондах, принадлежащих Музею-архиву истории изучения и освоения Европейского Севера Центра гуманитарных проблем Баренц региона — филиала ФИЦ КНЦ РАН, хранятся несколько рукописных дневников, авторы которых в первой половине XX в. были участниками арктических экспедиций. В статье рассмотрен потенциал экспедиционного дневника участника российской экспедиции на о. Диксон (1916) гидрометеоролога и климатолога Иннокентия Константиновича Тихомирова (1890–1955) как возможного исторического источника по истории организации и проведения научных исследований в Арктике. Благодаря дневнику И. К. Тихомирова реконструирован ход работ по организации в 1916 г. самой северной на тот момент метеорологической станции на о. Диксон.

Ключевые слова: арктические экспедиции, дневник, И. К. Тихомиров, исторические источники, метеорологическая станция, о. Диксон.

Для цитирования: Shabalina O.V., Kazakova K.S. Expedition diary — insights into the history of organizing and conducting Russian Arctic expeditions in the early XXth century // Проблемы Арктики и Антарктики. 2021. Т. 68. № 1. С/ 76–86. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-1-76-86>.

Поступила 19.02.2022

После переработки 09.03.2022

Принята 14.03.2022

Экспедиционный дневник как источник по истории организации и проведения российских арктических экспедиций начала XX века (расширенный реферат)

В фондах, принадлежащих Музею-архиву истории изучения и освоения Европейского Севера ЦГП КНЦ РАН, хранятся несколько рукописных дневников, авторы которых в первой половине XX в. были участниками арктических экспедиций. Среди них путевой дневник гидрометеоролога И. К. Тихомирова на о. Диксон в 1916 г., который изобилует подробностями экспедиционных будней, этнографическими описаниями и содержит уникальную информацию по истории организации в 1916 г. на о. Диксон метеорологических и гидрологических наблюдений.

Еще в 1914 г. Морское министерство России в качестве главной задачи Гидрографической экспедиции для исследования Северного Ледовитого океана (ГЭСЛО) определило сквозной проход экспедиционных судов из Владивостока на Мурман. Способствовать успешному проведению данной операции должна была сеть Карских радиостанций, созданных и оснащенных в течение 1913–1914 гг. На о. Диксон Главным гидрографическим управлением (ГГУ) к 26 августа 1915 г. было окончательно закончено оборудование радиостанции и места зимовки экспедиции. После возвращения экспедиционных судов в Архангельск было принято решение о закрытии арктической радиостанции, несмотря на то, что станция на о. Диксон могла бы использоваться Главным управлением почт и телеграфов и далее. Значимость работы станции на о. Диксон была отмечена в особом письме от Академии наук и директора-распорядителя Сибирского акционерного общества пароходства, промышленности и торговли И.И. Лида в Совет министров. После рассмотрения вопроса на государственном уровне было вынесено решение о продолжении работы станции и выделении дополнительных денежных средств на научное оборудование.

25 июня 1916 г. на пароходе «Лена» экспедиция для обустройства наблюдательной станции на о. Диксон отбыла из Красноярска. Участник экспедиции Иннокентий Константинович Тихомиров (1890–1955) описал ее ход в своем дневнике «Командировка на о. Диксона. VI–X / 1916». Начальником этого предприятия был назначен ветеринарный врач и коллежский ассессор Павел Григорьевич Кушаков (1881–1946), участвовавший в российской экспедиции Г. Я. Седова к Северному полюсу в 1912–1914 гг. в качестве заместителя начальника. После возвращения из этой экспедиции именно П. Г. Кушакову сначала доверили руководить работами по обустройству зимовки и радиостанции на о. Диксон в 1915 г., а в 1916 г. и «реанимационными» мероприятиями в отношении этой радиостанции.

Успех этого предприятия в немалой степени зависел от работы молодого специалиста — метеоролога-гидролога И. К. Тихомирова, наладившего специальное оборудование на станции и обучившего радистов снятию данных с приборов наблюдения. Его вклад в организацию самой северной в 1916 г. метеорологической станции на о. Диксон не отмечен в опубликованных ранее работах, посвященных этой теме. Благодаря источнику личного происхождения — путевому дневнику И. К. Тихомирова — этот момент прояснен, а ход экспедиции может быть представлен ретроспективно и детально. Информационная емкость такого источника личного происхождения, как экспедиционный дневник участника российской высокоширотной экспедиции на о. Диксон (1916), представляет несомненный интерес для специалистов широкого спектра.

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 подрисункных 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 12.04.2022
Формат 70×100 1/16
Тираж 75

Печать цифровая
Печ. л. 5,625

Заказ №

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

Signed to print 12.04.2022
Format 70×100 1/16
Edition 75

Digital Printing
P.s. 5,625
Order No

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