

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 69, № 1, 2023

**ARCTIC AND ANTARCTIC
RESEARCH**

Volume 69, No 1, 2023

Санкт-Петербург
2023
Saint Petersburg

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

Префикс DOI: 10.30758



Журнал публикует новые результаты комплексных исследований полярных областей Земли в области океанологии, метеорологии, климатологии, гидрологии, гляциологии, ледоведения, гидрохимии, палеогеографии, биологии и экологии полярных регионов, проблем экономической и социальной безопасности Арктики.

СОСТАВ РЕДКОЛЛЕГИИ:

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

Заместители главного редактора:

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

Члены редколлегии:

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

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

Редакция

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

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

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

Свидетельство о регистрации печатного издания ПИ № ФС 77-73644 от 7 сентября 2018 г.

Свидетельство о регистрации сетевого издания ЭЛ № ФС 77-73287 от 20 июля 2018 г.

Выданы Федеральной службой по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций

Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий ВАК, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук. Журнал публикует статьи по научным специальностям ВАК 25.00.29, 25.00.30, 1.6.8, 1.6.14, 1.6.16, 1.6.17.

Адрес редакции журнала «Проблемы Арктики и Антарктики»:

199397 Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38.

Тел. +7(812) 416-4251, e-mail: aaresearch@aari.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, 2023; © Росгидромет, 2023.

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, academician, Dr. of Sci., 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, academician, St. Petersburg, Russia;

Vladimir M. Kotlyakov, academician, Moscow, Russia;

Genady G. Matishov, academician, Rostov on the Don;

Oleg N. Pugachev, academician, St. Petersburg, Russia;

Vladislav A. Rumiantsev, academician, St. Petersburg, Russia;

Arkady A. Tishkov, RAS corr. member, Moscow, Russia

Editorial

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 IIII № ΦC 77-73644 of September 7, 2018.

Registration Certificate for the web publishing Э/И № ΦC 77-73287 of July 20, 2018.

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

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

Contacts:

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

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

<https://www.aaresearch.science>

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

© SSC RF AARI, 2023; © Roshydromet, 2023.

ПРЕДИСЛОВИЕ К НОМЕРУ

В настоящем номере опубликованы доклады, представленные на научно-практической конференции «Задачи и проблемы мониторинга природных условий Обской губы на фоне изменяющегося климата и интенсивной хозяйственной деятельности», проведенной в ААНИИ 25–26 октября 2022 г. Конференция объединила специалистов различных направлений: океанологов, гидрологов суши, метеорологов, экологов, представителей нефтегазодобывающих компаний и проектных организаций, занимающихся вопросами, так или иначе связанными с регионом Обской губы, и все доклады были интересны и выполнены на высоком профессиональном уровне.

Обско-Тазовский регион в последние годы стал объектом интенсивного антропогенного воздействия в силу активного освоения углеводородных ресурсов Ямала, Гыдана, Тазовского п-ова, а также реализации добычных проектов на месторождениях, расположенных непосредственно на акватории Обской губы (Камennomысское-море). Хозяйственная деятельность сопровождается развитием логистических потоков, строительством объектов различного назначения, в том числе гидротехнических сооружений. Еще 10–15 лет назад основное снабжение временных и постоянных пунктов, расположенных на территориях, окружающих Обскую губу, осуществлялось в период короткой летне-осенней навигации, а в продолжительный холодный сезон — вертолетами и по автозимникам. Заход судна в губу в ледовый период был событием крайне редким и случался не каждый год. В настоящее время круглогодичная навигация осуществляется в постоянном и регулярном режиме уже в три пункта Обской губы: порт Сабетта, Салмановский причал, Новопортовский терминал круглогодичной отгрузки нефти, и этот список расширяется. Большая часть морских перевозок по трассе Северного морского пути осуществляется между портами Европейской части России и пунктами Обской губы. Для обеспечения судоходства в северной части губы проложен морской канал через сравнительно мелководный бар.

Исследователи разных направлений отмечают в последние годы резкие изменения природных условий на акватории Обской губы. Наиболее очевидным показателем является смещение на юг границы заприпайной полыньи в период наибольшего развития припая в губе. Некоторые изменения фиксируются только в результате специальных наблюдений. В частности, в последнее время отмечается изменение характеристик прилива в ледовый сезон по сравнению с многолетними наблюдениями прошлых лет. Р.А. Виноградов с коллегами в своем докладе рассмотрели влияние климатических изменений и прогрессирующих темпов увеличения судоходства на формирование припая в Обской губе. Авторы отмечают сокращение площади припая и связывают его именно с антропогенным фактором.

Внедрение современных методов применительно к акватории Карского моря, включающей Обскую губу, представлено в статье В.В. Кириллова с большой группой соавторов. На основе спутниковых данных CryoSat-2 и SMOS рассмотрены вопросы дистанционного определения возрастного состава льдов.



Впервые за многие годы в номере опубликован обзор по физико-механическим свойствам льда Обской губы. В статье О.М. Андреева с соавторами проанализирован достаточно большой объем данных по физико-механическим характеристикам льда Обской губы, полученных в ходе различных экспедиций в течение последних тридцати лет. Рассмотрены характеристики пресного льда, покрывающего в зимний сезон большую часть губы, и соленого льда в северной части губы и на границе с Карским морем.

Переход на цифровые технологии в настоящее время приводит к необходимости решения методических проблем в оценке водосбора рек по данным ГИС, по сравнению с аналогичными результатами, полученными на основе бумажных карт традиционными методами. В статье Е.В. Румянцевой с соавторами рассмотрена изученность гидрологических характеристик малых рек, впадающих в Обскую и Тазовскую губы. Представлено ретроспективное описание исследований, начиная с экспедиции Б.М. Житкова, рассмотрен советский период, приведены сведения о сравнительно недавних экспедициях, проведенных уже в XXI веке.

Деградация наблюдательской сети в Арктике в конце XX — начале XXI века привела к потере надежных источников данных о колебаниях уровня. В работе Г.Н. Войнова с коллегами описана деятельность вневедомственного гидрологического поста с круглогодичным измерением уровня воды в районе мыса Каменный. Гидрологический пост функционирует с 2017 г. для обеспечения судоходства и является на сегодняшний день единственным источником данных ежечасных наблюдений за уровнем в Обской губе. Представлена методика обработки данных и краткосрочного прогноза уровня с заблаговременностью 12 часов. В работе отмечены изменения характеристик прилива в ледовый сезон по сравнению с многолетними данными прошлых лет.

Учитывая активизацию деятельности по освоению природных ресурсов региона Обской губы, большой интерес для специалистов представляет статья А.А. Добродеева и К.Е. Сазонова. В статье описаны исследования, выполненные в ледовом бассейне Крыловского государственного научного центра в течение последних двадцати лет в обеспечение проектирования и эксплуатации различных технических объектов, предназначенных для промышленного освоения Обской губы.

Рассчитываем, что статьи, опубликованные в настоящем номере, окажутся полезным дополнением к обширной научной библиографии, посвященной природным условиям Обской и Тазовской губ, а изложенный материал может быть использован для разработки новой программы комплексного мониторинга гидрометеорологических и экологических условий, соответствующей высокому статусу хозяйственной значимости региона. Надеемся, что наше предложение проводить такую конференцию один раз в два года найдет отклик и поддержку у соответствующих государственных структур и частных компаний.

*Ю.П. Гудошников, канд. геогр. наук,
руководитель лаборатории «Арктик-шельф им. Г.К. Зубакина» АНИИ,*



FOREWORD

The Proceedings contain papers presented at the science and technology conference “Tasks and problems of the monitoring of the Ob’ Bay natural conditions in the era of changing climate and intensive economic activity”, which took place at AARI on October 25–26, 2022. The conference brought together experts from different fields: oceanographers, hydrologists, meteorologists, ecologists, representatives of oil and gas companies and engineering companies dealing with issues pertaining to the Ob’ Bay area. All the papers were interesting and met a high professional standard.

In recent years, the Ob-Taz region has been under intensive anthropogenic impact due to the rapid development of the hydrocarbon resources on the Yamal, Gydan and Taz peninsulas, as well as the development of the oil and gas fields located in the Ob’ Bay water area (Kamennomysskoe-Sea Deposit). The economic activity is accompanied by a growth in logistics routes, construction of facilities for various applications, including hydraulic structures. Just 10–15 years ago the main supplies to the temporary and permanent settlements located in the areas around the Ob’ Bay were delivered in the short period of summer-autumn navigation, and in the long cold season only by helicopters and winter roads. Ships entering the Ob’ Bay during the ice season was a very rare occurrence and did not happen every year. At the present time all year-round navigation takes place on a regular basis at three sites of the Ob’ Bay: the Sabetta port, the Salmanovsky berth and the Novoportovskiy terminal, where oil is loaded all the year round, and the list is growing. The major part of the maritime shipping along the Northern Sea route is carried out between the ports of the European part of Russia and these sites in the Ob’ Bay. A ship canal was constructed in the relatively shallow northern part of the Ob’ Bay to provide safe navigation.

In recent years, researchers in different fields have noted radical changes in the natural conditions in the Ob’ Bay water area. The most obvious indicator is the southward displacement of the flaw polynya boundary in the period of the seasonal maximum of the fast ice development in the Bay. Some of the changes are recorded only by means of special observations. In particular, compared to the long-term observations of the past years, a change in the tide characteristics during the ice season has been noted in recent years. The influence of climatic changes and the progressive increase in navigation on the fast ice formation in the Ob’ Bay is discussed in the paper by R.A. Vinogradov and co-authors. These authors note a decrease in the fast ice area and attribute it to the anthropogenic factor.

The application of modern methods to the Kara Sea water area, including the Ob’ Bay, is presented in the article by V.V. Kirillov and co-authors. Remote estimation of the age of different types of ice cover is performed on the basis of satellite data of CryoSat-2 and SMOS.



For the first time in many years, a review of the physical and mechanical properties of ice in the Ob' Bay is presented. A large volume of data on the physical and mechanical ice characteristics of the Ob' Bay, obtained in numerous field studies in the last 30 years, is analyzed in the article by O.M. Andreev and co-authors. The paper considers the characteristics of fresh-water ice, which covers the most part of the Bay in the winter season, and salt ice in the northern part of the Bay and at the boundary with the Kara Sea.

At the present time, the digital transformation has led to the necessity of solving methodological problems in the estimation of the river catchment based on GIS data rather than traditional methods using paper maps. The article by E.V. Rumyantseva and co-authors discusses the understanding level of the hydrological characteristics of small rivers flowing into the Ob and Taz Bays. A review of the research activities starting with the expedition by B.M. Jitkov is presented, the Soviet period is considered, information on relatively recent expeditions organized in this century is also given.

The decline of the observation network in the Russian Arctic at the turn of the XXI century led to the loss of reliable sources of data on water level fluctuations. The paper by G.N. Voinov et al describes the activity of the tide gauge performing all year-round water level measurements in the area of the cape Kamenny. The tide gauge has been operating since 2017, supporting navigation, and it is the only source of hourly observations data on the water level in the Ob' Bay. A method of data processing and short-term level forecast with 12 hours' lead time is presented. The paper identifies changes in the tide characteristics in the ice season compared to long-term data of the past years.

The article by A.A. Dobrodeev and K.E. Sazonov describes studies conducted in the ice tank of the Krylov State Research Centre in the last 20 years, supporting the design and exploitation of various technical facilities intended for the industrial development of the Ob' Bay. Given the increased pace of natural resources development in the Ob' Bay area, this article will definitely be of interest to specialists in the field.

We expect that the articles published in the Proceedings will be a useful addition to the vast research literature dealing with the natural conditions of the Ob' Bay and Taz Bay, and the materials presented will be used for the development of a new program of comprehensive monitoring of hydrometeorological and ecological conditions, corresponding to the great economic significance of the region. We hope that our proposal to hold such a conference every two years will receive response and support from relevant state bodies and private companies.

*Head of the "Arctic-shelf" laboratory named after G.K.Zubakin, "AARI",
Yu.P.Gudoshnikov, PhD*



Содержание

ОКЕАНОЛОГИЯ

<i>В.В. Кириллов, О.В. Ловцкая, О.С. Девятаев, Е.В. Афанасьева, А.И. Сеницкий, Л.А. Хворова, Д.С. Фокин, А.Н. Семчуков, М.И. Ковешников, Н.М. Ковалевская.</i> Возможности исследования возрастных характеристик льда Карского моря на основе спутниковых данных CryoSat-2 и SMOS	10
<i>Г.Н. Войнов, Н.В. Головин, Н.В. Кубышкин, М.Ю. Кулаков, А.А. Скутин, К.Г. Смирнов, О.В. Хаймина.</i> К решению проблемы прогноза уровня моря у мыса Каменный в Обской губе	29
<i>О.М. Андреев, Н.В. Головин, Н.А. Крупина, Н.В. Кубышкин, А.А. Скутин, А.В. Чернов.</i> Оценки некоторых физико-механических характеристик льда Обской губы	44
<i>Р.А. Виноградов, О.М. Андреев, О.А. Морозова, Д.В. Драбенко, В.А. Драбенко.</i> Особенности совместного влияния интенсификации судоходства и изменения климата на распространение припая в Обской губе.....	58

ГИДРОЛОГИЯ СУШИ И ГИДРОХИМИЯ

<i>Е.В. Румянцева, О.В. Муждаба, И.И. Василевич, А.А. Пискун, М.В. Третьяков.</i> К вопросу современной изученности водного стока малых рек, впадающих в Обскую и Тазовскую губы	72
--	----

ЛЕДОТЕХНИКА

<i>А.А. Добродеев, К.Е. Сазонов.</i> Особенности выбора сценариев ледовых условий для модельных исследований в обеспечение промышленного освоения Обской губы	91
---	----

Contents

OCEANOLOGY

<i>V.V. Kirillov, O.V. Lovtskaya, O.S. Devyataev, E.V. Afanasyeva, A.I. Sinitsky, L.A. Khvorova, D.S. Fokin, A.N. Semchukov, M.I. Kovesnikov, N.M. Kovalevskaya.</i> Possibilities of investigating ice development of the Kara sea based on CryoSat-2 and SMOS data	10
<i>G.N. Voinov, N.V. Golovin, N.V. Kubyshkin, M.Yu. Kulakov, A.A. Skutin, K.G. Smirnov, O.V. Khaimina.</i> Approach to solving the problem of sea level forecasting off Cape Kamenny in the Ob' Bay	29
<i>O.M. Andreev, N.V. Golovin, N.A. Krupina, N.V. Kubyshkin, A.A. Skutin, A.V. Chernov.</i> Estimates of certain physical and mechanical characteristics of ice in the Ob' Bay	44
<i>R.A. Vinogradov, O.M. Andreev, O.A. Morozova, D.V. Drabenko, V.A. Drabenko.</i> Peculiarities of joint influence of navigation intensification and climate change on fast ice distribution in the Ob' Bay	58

HYDROLOGY OF LAND AND HYDROCHEMISTRY

<i>E.V. Rumiantseva, O.V. Muzhdaba, I.I. Vasilevich, A.A. Piskun, M.V. Tretiakov.</i> Water runoff of small rivers flowing into the Ob' and Taz Bay: current state of research	72
--	----

ICE TECHNOLOGY

<i>A.A. Dobrodeev, K.E. Sazonov.</i> The choice of ice conditions for ice model tests to support the industrial development of the Ob' Bay	91
--	----

ОКЕАНОЛОГИЯ
OCEANOLOGY

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-1-10-28>
УДК 551.326.7 (326.02)



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

**Возможности исследования возрастных характеристик льда
Карского моря на основе спутниковых данных CryoSat-2 и SMOS**

*В.В. Кириллов¹, О.В. Ловцкая¹, О.С. Девятаев², Е.В. Афанасьева^{2,3},
А.И. Сеницкий⁴, Л.А. Хворова⁵, Д.С. Фокин¹, А.Н. Семчуков¹,
М.И. Ковешников¹, Н.М. Ковалевская^{1*}*

¹ — ФГБУН Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия

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

³ — ФГБУН Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

⁴ — ГАУ ЯНАО Научный центр изучения Арктики, Салехард, Россия

⁵ — ФГБОУ ВО Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия

**knm@iwerp.ru*

Резюме

Получение информации о пространственно-временной изменчивости распределения толщины льда — ключевой вопрос для прогноза состояния арктического морского льда. Несмотря на очевидные успехи применения данных CryoSat-2 и SMOS, соответствующие оценки толщин морского льда нуждаются в валидации. В качестве эталонов для сравнения на основе метода максимального правдоподобия были выбраны детализированные ледовые карты ААНИИ (октябрь–апрель 2010–2018 гг.). В статье приводятся результаты распознавания различных возрастных стадий льда Карского моря, наилучшие результаты показали многолетний, однолетний толстый, средний лед и нилас. Использование данных Cryosat-2, SMOS и их комбинации Cryosat-2 & SMOS может помочь в комплексном анализе всей доступной информации для гидрометеорологического и навигационного обеспечения.

Ключевые слова: Карское море, комбинация CryoSat-2 & SMOS, ледовые карты ААНИИ, толщина льда, CryoSat-2, SMOS.

Для цитирования: Кириллов В.В., Ловцкая О.В., Девятаев О.С., Афанасьева Е.В., Сеницкий А.И., Хворова Л.А., Фокин Д.С., Семчуков А.Н., Ковешников М.И., Ковалевская Н.М. Возможности исследования возрастных характеристик льда Карского моря на основе спутниковых данных CryoSat-2 и SMOS // Проблемы Арктики и Антарктики. 2023. Т. 69. № 1. С. 10–28. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-1-10-28>.

Поступила 21.10.2022

После переработки 27.12.2022

Принята 19.01.2023

Possibilities of investigating ice development of the Kara sea based on CryoSat-2 and SMOS data

*Vladimir V. Kirillov¹, Olga V. Lovtskaya¹, Oleg S. Devyataev², Ekaterina V. Afanasyeva^{2,3},
Anton I. Sinitsky⁴, Lubov' A. Khvorova⁵, Denis S. Fokin¹,
Alexander N. Semchukov¹, Mikhail I. Kovesnikov¹, Nelley M. Kovalevskaya^{1*}*

¹ — Federal state budgetary institution of science Institute for Water and Environmental Problems
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IWEP SB RAS), Barnaul, Russia

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

³ — Federal state budgetary institution of science Space Research Institute
of the Russian Academy of Sciences (IKI), Moscow, Russia

⁴ — Arctic Research Center of the Yamal-Nenets Autonomous District, Salekhard, Russia

⁵ — Federal state budgetary educational institution of higher education
Altai State University, Barnaul, Russia

**knm@iwep.ru*

Summary

Sea ice age is a proxy for thickness, which can be obtained through the use of satellite data. The paper presents the results of comparison of CryoSat-2, SMOS and CryoSat-2 & SMOS fusion data with detailed ice charts (October–April, 2010–2018). The AARI ice charts were chosen as references for comparison because they integrate knowledge and data from various sources, including expert analysis of operational satellite information, in-situ measurements at coastal stations, data on ice conditions from ships of the Northern Sea Route (NSR). The division of satellite data elements into classes (stages of development) was performed according to the maximum likelihood classifier. The recognition result for each stage of development was evaluated by means of three criteria, in accordance with the class value of *Mode*, *Median* and *Mean*. The effectiveness of satellite data in determining the Kara Sea ice thickness varies depending on the sea ice stage of development and winter season time. Four stages of development (old ice, thick first-year ice, medium first-year ice, nilas) showed the best recognition results. Although the CryoSat-2 mission was designed primarily to detect climate-dependent variations of the thickness of floating ice, in terms of statistical recognition of the Kara Sea ice stages of development, CryoSat-2 data can also be used to retrieve the thickness of thick first-year ice (January–April) and the thickness of medium first-year ice (January–February). For the remaining stages within the study area, the altimetry method shows a significant uncertainty, which can be resolved for nilas, thin first-year ice and medium first-year ice (March) by using SMOS data and CryoSat-2 & SMOS fusion data. In general, altimetric data, radiometric data and combination thereof can be applied in the complex analysis of all available information to ensure hydrometeorological and navigation support. Also, it is proposed to use the data of the ICESat-2 laser altimeter and to make a general comparison with in-situ measurements.

Keywords: AARI ice maps, CryoSat-2, CryoSat-2 & SMOS combination, ice thickness, Kara Sea, SMOS.

For Citation: Kirillov V.V., Lovtskaya O.V., Devyataev O.S., Afanasyeva E.V., Sinitsky A.I., Khvorova L.A., Fokin D.S., Semchukov A.N., Kovesnikov M.I., Kovalevskaya N.M. Possibilities of investigating ice development of the Kara sea based on CryoSat-2 and SMOS data. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2023, 69 (1): 10-28. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-1-10-28>.

Received 21.10.2022

Revised 27.12.2022

Accepted 19.01.2023

ВВЕДЕНИЕ

Освоение минеральных ресурсов криолитозоны, при существенной роли России в обеспечении углеводородным сырьем жителей Азии и Европы, требует поиска техно-

логий, не нарушающих хрупкое экологическое равновесие Арктики. В настоящее время на акватории залива Карского моря — Обской губы осуществляется круглогодичная навигация в порт Сабетта и к Новопортовскому терминалу (п-ов Ямал), к Салмановскому причалу (п-ов Гыдан). Для развития транспортной инфраструктуры и расширения поставок из ЯНАО на основе Северного морского пути (СМП) и тяготеющих к нему речных коммуникаций необходимо учитывать возможные климатические изменения.

Для реконструкции изменения ледяного покрова используются различные типы наблюдений за морским льдом, в том числе — спутниковые данные с 1979 г. [1] и прямые наблюдения с 1850 г. [2]. Согласно последней оценке межправительственной группы экспертов ООН по изменению климата (МГЭИК) в последние годы площадь арктического морского льда была самой низкой с 1850 г. с точки зрения среднегодового значения [3]. МГЭИК пришла к выводу, что «Арктика, вероятно, будет практически свободна от морского льда в сентябре, по крайней мере, один раз до 2050 года» [3, с. 16].

Чувствительным индикатором изменения климата и характеристикой, оказывающей существенное влияние на сопротивление льдов движению судна, является толщина льда. Существует значительный геофизический интерес к пространственному распределению этого важного показателя общих ледовых условий, обеспечивающего третье измерение ледяного покрова (после сплоченности и ледовитости), в том числе для документирования изменений, тенденций и понимания процессов, а также для использования в построении прогнозов поведения ледяного покрова в различных временных масштабах [4]. Толщина морского льда является климатически значимой переменной, которая обеспечивает интегрированную меру изменений в энергетическом балансе высоких широт [5]. Таким образом, прогноз состояния арктического морского льда — сложная задача, ключевым вопросом которой является информация о пространственно-временной изменчивости толщины льда.

Основным российским материалом о ледовой обстановке в арктических морях являются ледовые карты, создаваемые в ААНИИ [6]. Уникальная особенность детализированных ледовых карт ААНИИ — использование знаний ледовых экспертов и экспертного анализа оперативной спутниковой информации с привлечением данных контактных измерений на припаях вблизи береговых станций и данных о ледовой обстановке с судов на трассах СМП [7]. По ледовым картам ААНИИ определяется распределение важнейших характеристик ледяного покрова, в том числе возрастных стадий развития морского льда. Возраст морского льда является косвенным показателем толщины, поскольку лед становится толще в течение осенне-зимнего сезона замерзания и далее в течение последовательных зимних периодов [8]. Толщина и возрастные стадии морского льда, по крайней мере для первого годичного цикла развития, демонстрируют прямую связь при сравнении в панарктических или региональных пространственных масштабах, карты с указанием возрастных стадий льда могут быть использованы в качестве косвенных показателей для толщины, когда она не может быть непосредственно измерена [9].

Для оценки толщин используются как непосредственно контактные, так и разнообразные дистанционные измерения, в том числе спутниковые, хотя толщину морского льда гораздо труднее измерить из космоса, чем сплоченность и ледовитость [10]. Тем не менее новые технологии обеспечивают большие прорывы. В частности, спутниковая альтиметрия позволила на основе прямых измерений превышения льда получать регулярные оценки толщины и далее объема морского льда по всему Арктическому бассейну, начиная с радиолокационного высотомера ESA CryoSat-2, за-

пущенного в 2010 г. [11]. Многие исследования толщины морского льда базируются на информации, полученной с помощью радиолокационной альтиметрии как со спутника Cryosat-2, так и на измерениях радиояркостной температуры со спутника Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS), запущенного в 2009 г. [12–15].

Несмотря на очевидные успехи применения данных CryoSat-2 и SMOS, исследователи сходятся во мнении, что не существует золотого стандарта для оценки средней толщины морского льда, все существующие методы измерения имеют один или несколько крупных источников неопределенности и соответствующие оценки толщин морского льда нуждаются в валидации [5, 14, 16–18]. Ряд исследователей показывает, что решение проблемы неопределенностей зависит от специфики акватории (разное время начала таяния и сокращения площади льда, возможное влияние адвекции льда и т. д.) [8, 15].

Задачей представленного исследования было сравнение эффективности использования искомым спутниковых данных для Карского моря с детализированными ледовыми картами ААНИИ (портал <http://wdc.aari.ru/datasets/d0004/kar/> — последний доступ: 01.08.2022), которые были выбраны в качестве эталонов, интегрирующих знания и данные различной природы о возрастных характеристиках морского льда.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Ледовые карты и специфика исследуемой акватории

Ледовые карты ААНИИ представляют собой результат визуального дешифрирования спутниковых изображений, получаемых в различных диапазонах электромагнитного спектра, а именно: видимом, инфракрасном (ИК) и микроволновом (включает в себя пассивную и активную съемку). Также привлекается вспомогательная гидрометеорологическая информация с береговых станций и судов [7].

При анализе спутниковых изображений эксперты руководствуются знанием дешифровочных признаков различных типов льда, регламентированных стандартом Всемирной метеорологической организации (ВМО) «Номенклатура ВМО по морскому льду» [19]. Дешифровочные признаки включают в себя тональные и текстурные характеристики льдов в сочетании с общей структурой ледяного покрова на снимке. Под структурой здесь подразумеваются частота и взаимная ориентация каналов и разводий во льду, размер и форма встречающихся ледяных полей и т. п. Эти характеристики также воспринимаются экспертом и учитываются при определении возраста льда.

Экспертный анализ спутниковых изображений, по сути, заключается в выделении зон, ледовые условия внутри которых однородны, с последующим присвоением этим зонам соответствующих ледовых характеристик: сплоченность, возраст, форма льда (размеры полей). В зависимости от указанных характеристик зоне присваивается цвет и символ.

Для описания особенностей ледового режима Карского моря обратимся к результатам, полученным специалистами ААНИИ на основе анализа электронных ледовых карт за 1997–2017 гг. [20, 21].

В северо-восточной части моря, расположенной к северу от линии м. Желания — о. Диксон, ледообразование при среднеклиматических условиях начинается в конце августа — начале сентября. К концу октября район может быть полностью покрыт молодыми льдами. Далее молодой лед постепенно переходит в градиацию однолетнего тонкого льда. С середины января до середины апреля среди дрейфующих льдов преобладает однолетний средний. С конца апреля может отмечаться преобладание однолетнего толстого льда.

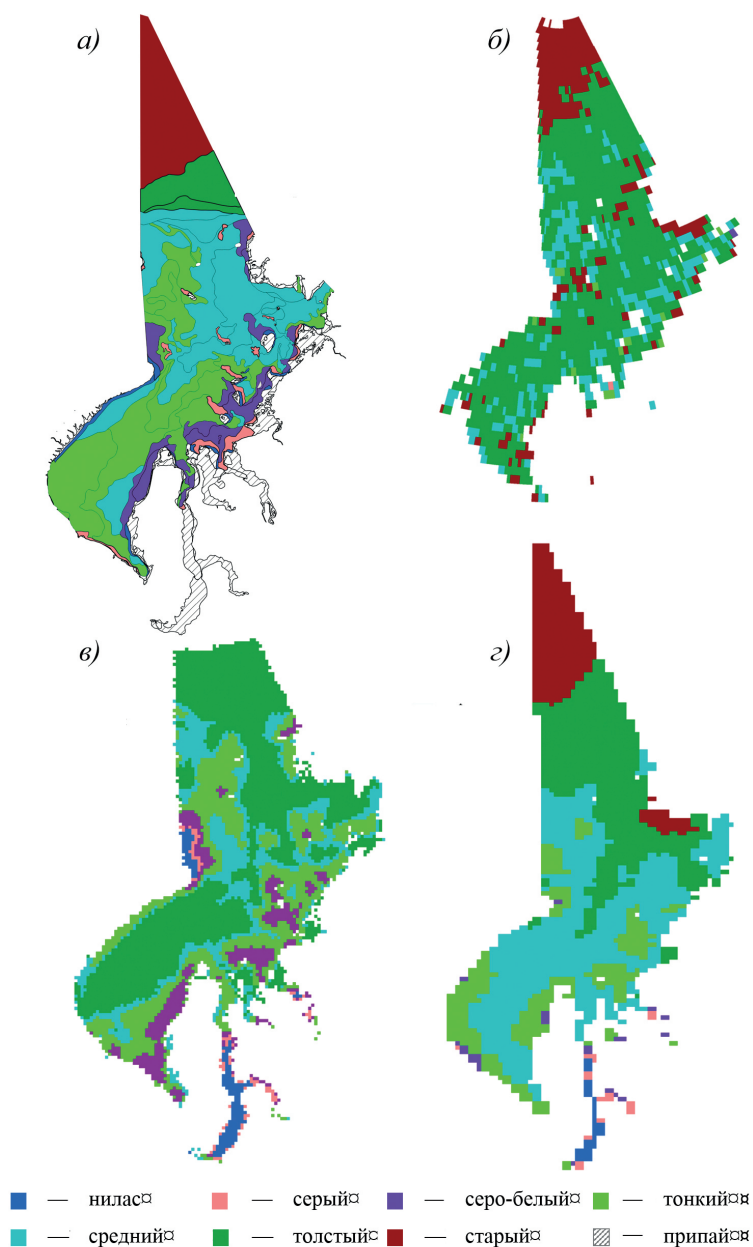


Рис. 1. Ледовая карта ААНИИ (а), данные спутников CryoSat-2 (б), SMOS (в) и спутниковой комбинации CryoSat-2 & SMOS (г), март 2018 г. Использована единая окраска данных по возрастным градациям (интервалам толщины льда) в соответствии с российской национальной символикой ледовых карт [23]

Fig. 1. AARI ice chart (a) and data from CryoSat-2 (b), SMOS (c) and CryoSat-2 & SMOS (d), March of 2018. The colour coding of the ice charts is based on the Russian national colour standard for stages of ice development (ice thickness intervals) [23]

В юго-западной части моря лед начинает формироваться в начале октября. К концу ноября, опять же при среднеклиматических условиях, район полностью покрывается льдами, когда процесс ледообразования достигает пролива Карские Ворота. Преобладание молодых льдов сохраняется до начала января, а с середины месяца в преобладание переходит однолетний тонкий лед. Однолетний средний лед преобладает с конца февраля вплоть до окончания зимнего периода в Арктике, до мая. Однолетний толстый лед начинает формироваться в конце февраля, но в преобладание переходит лишь в редких случаях, а в отдельные годы он вовсе не формируется.

К окончанию зимнего сезона среди дрейфующих льдов Карского моря присутствуют все возрастные градации от ниласа до однолетнего толстого льда за счет постоянного обновления льда в полыньях и разводах.

Нарастание толщины припайного льда во всем море происходит быстрее, чем в дрейфующих льдах.

Описанные особенности ледового режима относятся к периоду потепления в Арктике, начавшемуся во второй половине 1980-х гг. Если в марте 1985 г. до трети ледяного покрова составлял многолетний лед возрастом более 4 лет, то в марте 2019 г. многолетний лед такого возраста составлял только порядка одного процента от общей площади льда в Северном Ледовитом океане [22]. Полученная на основе данных CryoSat-2 & SMOS среднемесячная толщина морского льда в апреле 2021 г. была ниже, чем в том же месяце в предыдущие годы [8].

В нашем исследовании толщина льда Карского моря анализировалась на основе использования детализированных ледовых карт распределения льда различного возраста в Карском море и трех наборов спутниковых данных: CryoSat-2 sea ice thickness (L2P); SMOS sea ice thickness (L3); комбинация Cryosat-2 & SMOS sea ice thickness (L4). Данные представлены на рис. 1 и в табл. 1 (АВИ – Институт им. Альфреда Вегенера). Ежемесячные данные CryoSat-2 анализировались на основе использования одной из еженедельных ледовых карт соответствующего месяца.

Таблица 1

Ледовые данные, использованные в исследовании

Table 1

Ice data used in the study

Продукт	Производитель/ спутник	Распространитель	Период исследования	Временное разрешение	Разрешение (км)
Детализированные ледовые карты распределения льдов различного возраста	ААНИИ	ААНИИ, Россия	2010–2018	7 дней	0,1 – 25 в зависимости от используемого набора снимков ИСЗ
Sea Ice Thickness CS2 L2P	CryoSat-2	АВИ, Германия	2010–2018	Ежемесячно (январь– апрель, октябрь– декабрь)	25
Sea Ice Thickness SMOS L3	SMOS	АВИ, Германия	2010–2018	Ежедневно	12,5
Sea Ice Thickness CS2 SMOS L4	CryoSat-2 & SMOS	АВИ, Германия	2010–2018	Ежедневно	25

CryoSat-2

Основной целью миссии CryoSat-2 является определение толщины арктического морского льда на основе измерений превышения снежно-ледяного слоя методом радиолокационной альтиметрии и последующих преобразований при предположении гидростатического равновесия.

Эффективность использования данных CryoSat-2 о толщине морского льда была продемонстрирована многими исследованиями [10, 17, 24–26]. Так, данные CryoSat-2 использовались: для улучшения физической модели морского льда [25]; для получения вывода о том, что «судьба арктического летнего морского льда в значительной степени зависит от атмосферных условий во время сезона таяния, а не от зимних температур» [25, с. 125]; для проверки гипотезы о том, что стабилизирующая обратная связь зимнего прироста льда ослабляется усиливающимся влиянием более теплых подповерхностных атлантических вод и поверхностных вод в Карском море, в частности [26].

Алгоритм, разработанный в Институте им. Альфреда Вегенера (АВИ) для получения данных Sea Ice Thickness CS2 L2P, состоит из двух основных этапов: оценка превышения морского льда над уровнем моря по данным CryoSat-2 и преобразование превышения в толщину морского льда с использованием дополнительных наборов данных (рельеф, тип подстилающей поверхности, плотность и высота снежного покрова и т. д.) [28]. Большая часть привлекаемых данных может быть определена в режиме почти реального времени (+2 дня), исключение составляют ежемесячные климатические данные по снегу. Использование последних влияет, в частности, на эффективность определения толщины молодого морского льда по данным CryoSat-2: такой лед имеет тонкий снежный покров, но при обработке в соответствии с алгоритмом АВИ используется статистическая (завышенная) оценка высоты снежного покрова.

Таким образом, метод извлечения информации о толщине из исходных данных CryoSat-2 недостаточно чувствителен для льда с толщиной, меньшей, чем некоторая граница $Ice_{thick} \sim 1$ м [14]. Значение этой границы — условная величина, что является одним из аспектов неопределенности измерений толщины и нуждается в конкретизации в зависимости от специфики акватории и месяца зимнего сезона [15, 27].

Неэффективность измерения с помощью данных CryoSat-2 для льда с толщиной $< Ice_{thick}$ может быть компенсирована измерениями с помощью данных SMOS, которые предназначены для измерения толщин $< Ice_{thick}$ [14].

SMOS

Другой метод измерения толщины основан на оценке яркостной температуры над поверхностью с помощью L-диапазона спутника миссии SMOS, которая обеспечивает наблюдения с высоким временным разрешением (на ежедневной основе). Зависимость толщины льда от яркостной температуры позволяет использовать данные SMOS для оценки толщины морского льда с толщиной $< Ice_{thick}$ [13].

Относительные неопределенности измерения толщины льда с помощью CryoSat-2 и SMOS носят взаимодополняющий характер [14]. Пространственный охват также носит дополняющий характер из-за различных наклонов орбит. Предполагается, что комбинация данных CryoSat-2 и данных SMOS характеризуется меньшей неопределенностью измерений по сравнению с неопределенностями измерений отдельных спутников.

CryoSat-2 & SMOS

Совместная обработка данных CryoSat-2 и SMOS основана на специальном статистическом подходе оптимальной интерполяции, разработанном в АВИ, который объединяет информацию от CryoSat-2 и SMOS для различных классов толщины льда ($> Ice_{thick}$, $< Ice_{thick}$). Совместный продукт был разработан в рамках проекта EKA SMOS+ Sea Ice для получения пространственной оценки толщины льда с разрешением 25 км [14].

Цель данного исследования состоит в том, чтобы рассмотреть возможности продуктов CryoSat-2, SMOS и их комбинации, в том числе определить значение границы Ice_{thick} для исследуемой акватории, принимая во внимание необходимость использования оценок пространственного распределения толщины льда Карского моря, а также взаимодополняемость данных CryoSat-2 и SMOS.

МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНЕНИЯ

Сравнение результатов обработки спутниковых данных CryoSat-2, SMOS, CryoSat-2 & SMOS с соответствующими ледовыми картами (октябрь–апрель 2010–2018 гг.) осуществлялось на основе статистической классификации. Элементы спутниковых данных ($12,5 \times 12,5$ км², 25×25 км²) разбивались на классы в соответствии с возрастными стадиями на ледовой карте (рис. 2).

В основе такого разбиения — классификатор с обучением, использующий метод максимального правдоподобия [29]. Для старого льда рассматривался интервал толщин [2 м; 3 м), крайняя правая граница выбиралась в соответствии с рекомендацией брать «открытый» интервал, близкий предыдущему [30].

Результат распознавания каждой возрастной стадии оценивался по нескольким критериям. Если бóльшая модальная вершина (*Mode*) распределения спутниковых элементов класса, соответствующего некоторой возрастной стадии, попадает в интервал толщин той же самой возрастной стадии, то считалось, что эти спутниковые данные позволяют распознавать лед конкретной возрастной стадии *на основе критерия по значению моды*. Для каждой ситуации попадания модальной вершины в искомый интервал толщин рассчитывался процент распознавания ($Proc_{rec}$). Чем

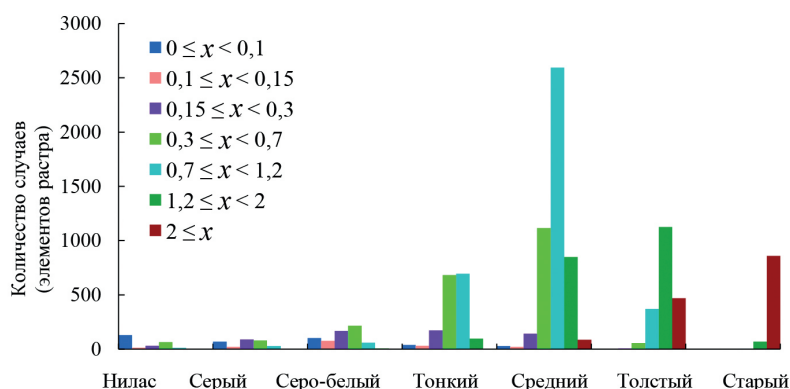


Рис. 2. Распределение элементов комбинации CryoSat-2 & SMOS по классам (возрастным стадиям), март, 2010–2018 гг.

Fig. 2. Distribution of CryoSat-2 & SMOS elements over different classes (development stages), March, 2010–2018

выше значения $Proc_{rec}$, тем лучший результат показывают спутниковые данные по отношению к искомой возрастной стадии. Проверка достоверности полученных распознаваний проводилась с помощью критерия Стьюдента для сравнения относительных частот внутри одного класса [31] в двух категориях случаев: $Proc_{rec} > 50\%$ (надежное распознавание) и $Proc_{rec} < 50\%$ (менее надежное распознавание). В последующих расчетах использовались только достоверные распознавания (табл. 2–6).

В нашем исследовании также рассматривались дополнительные описательные статистические характеристики — медиана (*Median*), среднее значение (*Mean*), стандартное отклонение (*StD*), асимметрия (*Skewness*) и эксцесс (*Excess*) — и два дополни-

Таблица 2

Результаты распознавания возрастных стадий по спутниковым данным CryoSat-2

Table 2

Results of development stage recognition based on CryoSat-2 data

Месяц	Ледовые карты (2010–2018 гг.). Возрастная стадия [толщина льда, м]	Cryosat-2 (2010–2018 гг.)						
		<i>Mode</i>	<i>Proc_{rec}</i> (%)	<i>Median</i>	<i>Mean</i>	<i>StD</i>	<i>Skewness</i>	<i>Excess</i>
Ноябрь	Тонкий [0,3; 0,7]	0,58	47	0,65	0,77	0,43	0,96	0,35
Декабрь	Тонкий [0,3; 0,7]	0,65	46	0,68	0,76	0,37	1,06	1,71
Январь	Средний [0,7; 1,2]	1,02	58	1,04	1,11	0,38	0,43	0,003
Январь	Толстый [1,2; 2]	1,53	62	1,5	1,53	0,62	1,64	0,26
Февраль	Средний [0,7; 1,2]	1,12	52	1,15	1,25	0,40	0,63	0,46
Февраль	Толстый [1,2; 2]	1,61	81	1,62	1,66	0,54	1,68	0,58
Февраль	Старый [2; 3]	2,45	84	2,4	2,35	1,15	1,07	–1,84
Март	Толстый [1,2; 2]	1,69	71	1,74	1,83	0,43	0,78	–0,73
Март	Старый [2; 3]	2,44	82	2,39	2,34	0,61	1,05	–1,84

Таблица 3

Результаты распознавания возрастных стадий по спутниковым данным SMOS

Table 3

Results of development stage recognition based on SMOS data

Месяц	Ледовые карты (2010–2018 гг.). Возрастная стадия [толщина льда, м]	SMOS (2010–2018 гг.)						
		<i>Mode</i>	<i>Proc_{rec}</i> (%)	<i>Median</i>	<i>Mean</i>	<i>StD</i>	<i>Skewness</i>	<i>Excess</i>
Октябрь	Нилас [0,0; 0,1]	0,059	38	0,15	0,22	0,19	1,39	1,95
Октябрь	Серо-белый [0,15; 0,3]	0,25	45	0,26	0,35	0,25	1,23	0,75
Ноябрь	Нилас [0,0; 0,1]	0,055	66	0,075	0,14	0,19	2,64	6,91
Ноябрь	Тонкий [0,3; 0,7]	0,57	60	0,58	0,62	0,24	0,17	–0,81
Декабрь	Нилас [0,0; 0,1]	0,054	56	0,089	0,19	0,21	1,91	3,42
Декабрь	Тонкий [0,3; 0,7]	0,68	47	0,66	0,68	0,26	–0,20	–1,23
Январь	Нилас [0,0; 0,1]	0,051	69	0,073	0,21	0,30	1,95	3,54
Январь	Тонкий [0,3; 0,7]	0,66	48	0,65	0,68	0,25	–0,10	–1,37
Январь	Средний [0,7; 1,2]	0,88	69	0,84	0,81	0,21	–0,87	–1,12
Февраль	Нилас [0,0; 0,1]	0,059	40	0,14	0,24	0,26	1,70	1,95
Февраль	Тонкий [0,3; 0,7]	0,60	46	0,57	0,60	0,29	–0,008	–1,16
Февраль	Средний [0,7; 1,2]	0,87	64	0,81	0,77	0,24	–0,88	–0,59
Март	Нилас [0,0; 0,1]	0,053	54	0,093	0,21	0,23	1,61	3,57
Март	Тонкий [0,3; 0,7]	0,62	43	0,56	0,59	0,29	0,017	–1,27
Март	Средний [0,7; 1,2]	0,84	57	0,76	0,73	0,26	–0,64	–0,96
Апрель	Тонкий [0,3; 0,7]	0,47	42	0,36	0,41	0,28	0,58	–0,48

Эффективность распознавания ниласа на основании данных SMOS

Table 4

Effectiveness of nilas recognition based on SMOS data

Месяц	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Январь	Февраль	Март
<i>Proc_{rec}</i>	38 %	66 %	56 %	69 %	40 %	54 %

Таблица 5

Результаты распознавания возрастных стадий по комбинации CryoSat-2 & SMOS

Table 5

Results of development stage recognition based on CryoSat-2 & SMOS

Месяц	Ледовые карты (2010–2018 гг.). Возрастная стадия [толщина льда, м]	CryoSat-2 & SMOS (2010–2018 гг.)						
		<i>Mode</i>	<i>Proc_{rec}</i> (%)	<i>Median</i>	<i>Mean</i>	<i>StD</i>	<i>Skewness</i>	<i>Excess</i>
Октябрь	Нилас [0,0; 0,1)	0,055	45	0,11	0,21	0,21	1,54	2,21
Октябрь	Серо-Белый [0,15; 0,3)	0,26	34	0,50	0,7	0,54	0,70	–1,01
Ноябрь	Нилас [0,0; 0,1)	0,054	69	0,072	0,14	0,19	2,81	7,88
Декабрь	Нилас [0,0; 0,1)	0,056	61	0,082	0,15	0,17	1,99	3,84
Январь	Нилас [0,0; 0,1)	0,051	68	0,074	0,27	0,42	2,02	3,1
Январь	Средний [0,7; 1,2)	0,99	73	1,01	1,08	0,31	1,10	1,20
Январь	Толстый [1,2; 2)	1,67	77	1,72	1,81	0,38	1,28	–0,37
Февраль	Средний [0,7; 1,2)	0,98	68	1,0	1,06	0,36	1,018	1,57
Февраль	Толстый [1,2; 2)	1,6	84	1,59	1,61	0,32	0,71	2,01
Февраль	Старый [2; 3)	2,47	91	2,45	2,42	0,27	–3,0	3,97
Март	Нилас [0,0; 0,1)	0,053	51	0,098	0,25	0,31	2,76	7,59
Март	Средний [0,7; 1,2)	0,93	54	0,91	0,96	0,43	0,88	12,98
Март	Толстый [1,2; 2)	1,63	55	1,97	1,65	0,55	0,15	1,45
Март	Старый [2; 3)	2,48	92	2,46	2,43	0,25	–3,27	–0,51
Апрель	Тонкий [0,3; 0,7)	0,52	42	0,45	0,50	0,34	0,78	9,44
Апрель	Средний [0,7; 1,2)	0,78	45	0,71	0,73	0,34	0,55	0,57
Апрель	Старый [2; 3)	2,46	87	2,43	2,38	0,31	–2,30	0,81

Таблица 6

Эффективность распознавания ниласа на основании данных CryoSat-2 & SMOS

Table 6

Effectiveness of nilas recognition based on CryoSat-2 & SMOS data

Месяц	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Январь	Март
<i>Proc_{rec}</i>	45 %	69 %	61 %	68 %	51 %

тельных критерия распознавания. Если спутниковые данные позволяют распознавать лед некоторой возрастной градации на основе критерия по значению моды, а медиана соответствующего распределения попадает в тот же интервал толщин, то считалось, что эти спутниковые данные позволяют распознавать лед конкретной возрастной градации на основе двух критериев — по значению моды и по значению медианы. Если спутниковые данные позволяют распознавать лед конкретной возрастной градации на основе двух критериев, а среднее значение соответствующего распределения попадает в тот же интервал толщин, то считалось, что эти спутниковые данные позволяют распознавать лед конкретной возрастной градации на основе трех критериев — по значению моды, по значению медианы и по значению среднего значения.

Результаты по данным CryoSat-2

В табл. 2 и на рис. 3 представлены возможности распознавания возрастных стадий льда на основе использования спутниковых данных CryoSat-2 и различных критериев.

В случаях $Proc_{rec} > 50\%$ распознавание возрастных стадий возможно на основе трех критериев: средний лед (январь–февраль), толстый лед (январь–апрель), старый лед (февраль–апрель).

При этом результаты распознавания *многолетнего льда* показывают наибольший процент распознавания (85–85 %), StD в интервале $[0,61–1,15]$. Результаты распознавания *толстого льда* также показывают высокий $Proc_{rec}$ (62–81 %), StD в интервале $[0,43–0,62]$. Для *среднего льда* $Proc_{rec} > 50\%$ (52–58 %), StD в интервале $[0,38–0,4]$.

Тонкий лед в ноябре–декабре распознается на основе данных CryoSat-2 с $Proc_{rec} < 50\%$, возможно использование любого из двух критериев — по значениям моды и/или медианы.

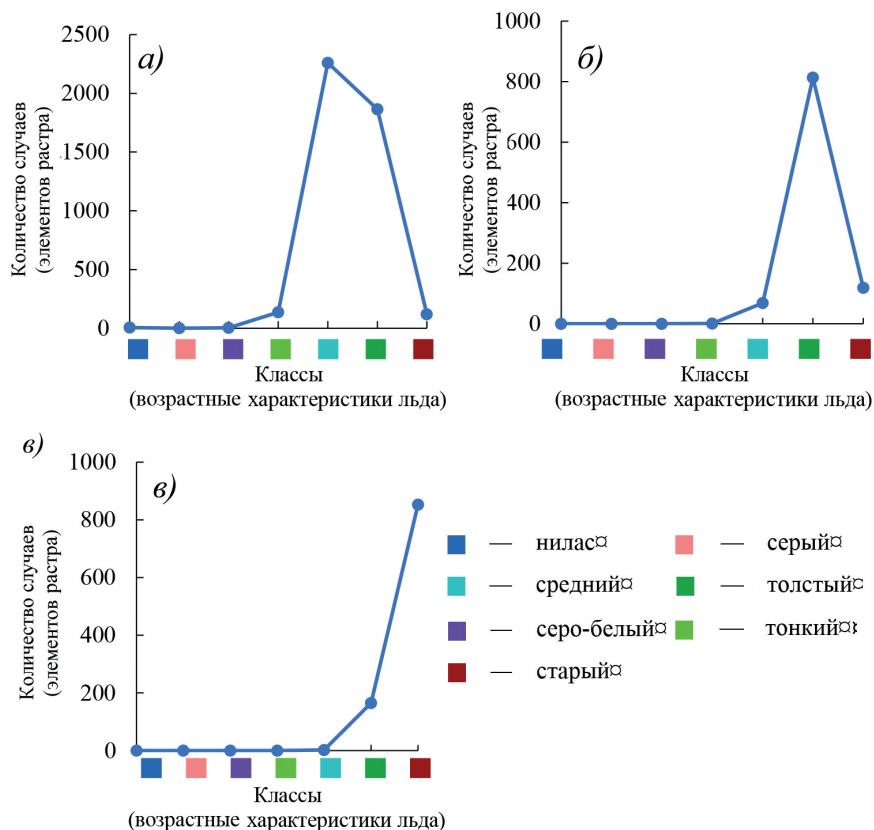


Рис. 3. Распределения элементов CryoSat-2 для разных классов (февраль, 2010–2018 гг.): а) — средний лед, б) — толстый лед, в) — старый лед

Fig. 3. Distribution of CryoSat-2 elements over different classes (February, 2010–2018): а) — medium first-year ice, б) — thick first-year ice, в) — old ice

Результаты по данным SMOS

В табл. 3 и на рис. 4 представлены возможности распознавания возрастных стадий льда на основе использования спутниковых данных SMOS и различных критериев. В отличие от CryoSat-2, SMOS обнаруживает способность распознавать нилас в течение почти полного зимнего арктического сезона (октябрь–март). Также SMOS показывает большую, чем CryoSat-2, способность распознавать тонкий лед (октябрь–апрель) и хорошую способность распознавать средний лед в январе–марте.

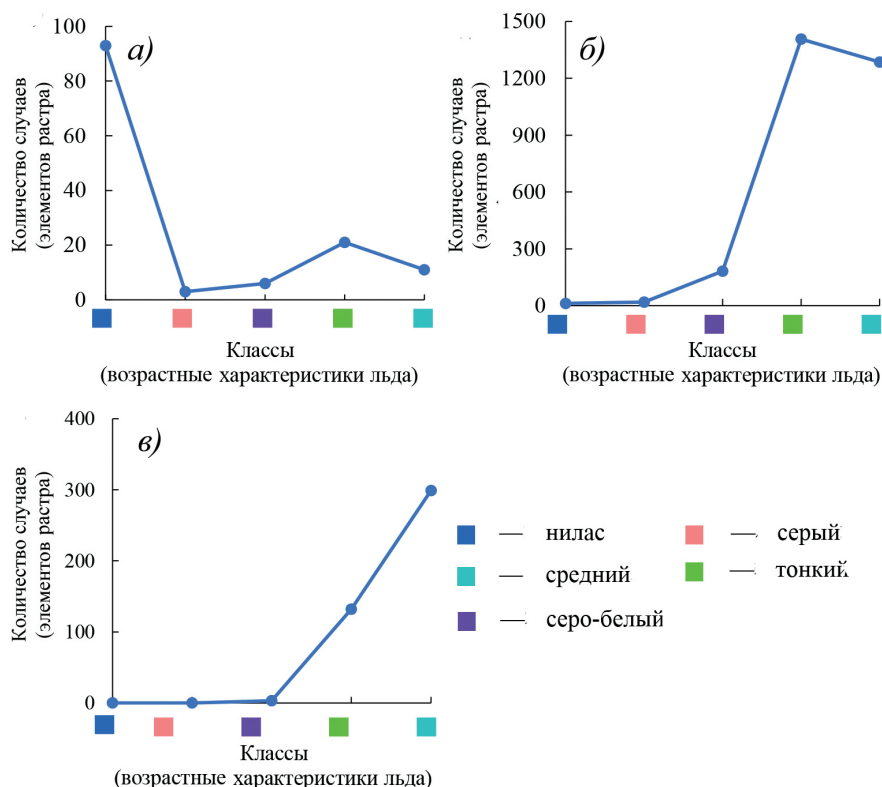


Рис. 4. Распределения элементов SMOS для разных классов (январь, 2010–2018 гг.): а) — нилас, б) — тонкий лед, в) — средний лед

Fig. 4. Distribution of SMOS elements over different classes (January, 2010–2018): а) — nilas, б) — thin first-year ice, в) — medium first-year ice

Нилас может быть распознан с помощью данных SMOS на основании двух критериев, при этом эффективность распознавания ниласа на основании модального критерия чередуется относительно границы $Proc_{rec} = 50\%$ от месяца к месяцу (табл. 4).

Тонкий лед может быть распознан на основе использования любого из трех критериев. Минимальное значение стандартного отклонения (0,24) достигается при распознавании тонкого льда в единственном месяце с $Proc_{rec} > 50\%$ (ноябрь; $Proc_{rec} = 60\%$), для всех остальных месяцев зимнего арктического сезона (декабрь–апрель; $Proc_{rec} < 50\%$) StD принимает значения, близкие к минимальному ([0,25; 0,29])

Средний лед распознается с помощью данных SMOS в трех месяцах зимнего арктического периода (январь–март) с $Proc_{rec} > 50\%$ на основе трех критериев, StD в узком интервале $[0,24; 0,26]$.

Результаты по комбинации данных CryoSat-2 & SMOS

В табл. 5 и на рис. 5 представлены возможности распознавания возрастных стадий льда на основе использования комбинации спутниковых данных CryoSat-2 & SMOS и различных критериев. *Нилас* распознается на основе использования комбинации спутниковых данных почти во все месяцы арктического зимнего периода (октябрь–март), как и на основании использования данных SMOS. Основные критерии распознавания — по моде и медиане, вариации $Proc_{rec}$ по месяцам (табл. 6) сопоставимы с вариациями, полученными при использовании данных SMOS (см. табл. 4).

Средний лед надежно распознается на основе использования комбинации CryoSat-2 & SMOS с января по апрель с убывающим $Proc_{rec}$: 73 % (январь), 68 % (февраль), 54 % (март), 45 % (апрель). Возможно использование трех критериев распознавания, StD попадает в интервал $[0,31; 0,43]$.

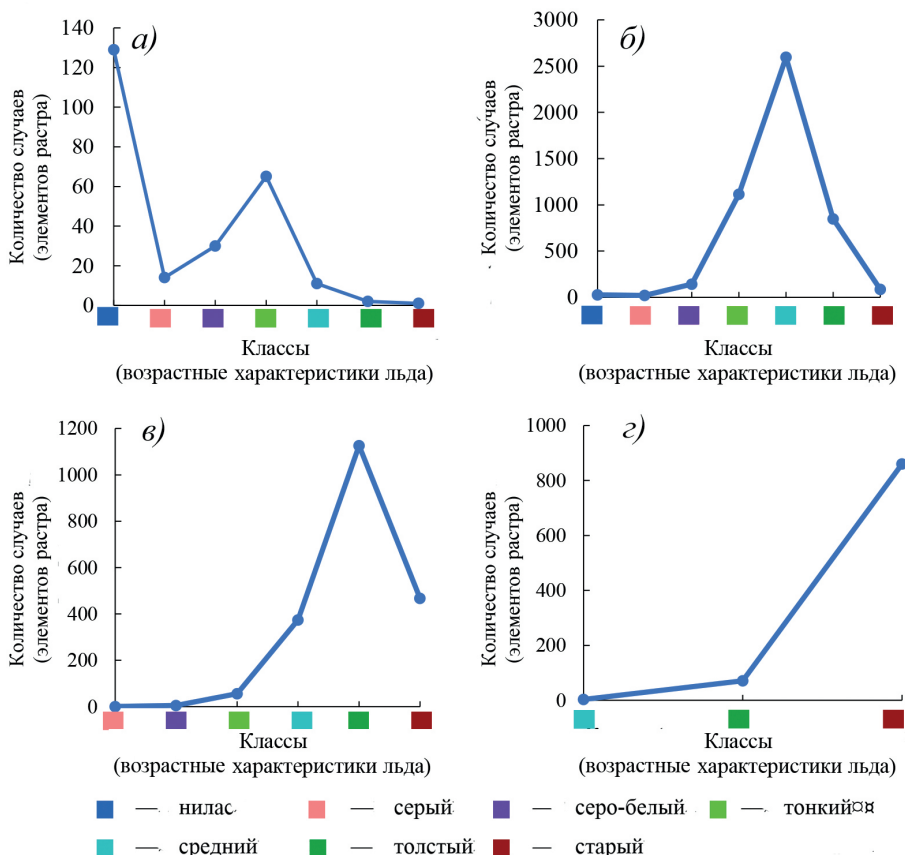


Рис. 5. Распределения элементов CryoSat-2 & SMOS для разных классов (март, 2010–2018 гг.): а) — нилас, б) — средний лед, в) — толстый лед, з) — старый лед

Fig. 5. Distribution of CryoSat-2 & SMOS elements over different classes (March, 2010–2018): а) — nilas, б) — medium first-year ice, в) — thick first-year ice, з) — old ice

Толстый лед также надежно распознается на основе использования комбинации CryoSat-2 & SMOS с января по март с варьирующим $Proc_{rec}$: 77 % (январь), 84 % (февраль), 55 % (март). Также возможно использование трех критериев распознавания, StD попадает в интервал $[0,32; 0,55]$.

Старый лед показывает самые высокие $Proc_{rec}$ в феврале–апреле на основе использования комбинации спутниковых данных: 91 % (февраль), 92 % (март), 87 % (апрель). Кроме того, возможно использование трех критериев распознавания, StD попадает в узкий интервал $[0,25; 0,31]$, меньший, чем при использовании данных CryoSat-2 для распознавания этой же возрастной стадии.

С помощью радиометрических данных SMOS распознается нилас, тонкий и средний лед, в зависимости от месяца. Поэтому в контексте Карского моря значение Ice_{thick} — скользящее от 0,5 м до 1 м (1 м — крайнее значение границы неопределенности [14]).

Хотя программа CryoSat-2 в первую очередь предназначалась для измерения толщины многолетнего льда, но в контексте Карского моря ее также можно использовать для определения толщины однолетнего (толстого и, в отдельные месяцы, и среднего) льда. В отношении остальных возрастных стадий льда Карского моря альтиметрический метод показывает значительную неопределенность, которая может быть заполнена данными SMOS и комбинацией CryoSat-2 & SMOS для ниласа, тонкого однолетнего льда и, в отдельные месяцы, среднего льда.

Также использованные данные могут быть дополнены данными лазерного высотомера Ice, Cloud и Land Elevation 2 (ICESat-2, с 2018), который имеет одинаковые с CryoSat-2 модальную толщину и распределение толщин, что позволяет предположить, что два независимых прибора могут предоставлять последовательную, но взаимодополняющую информацию [8, 11].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сложность ледовых условий и их влияние на различные виды морской деятельности в основном связаны с колебаниями площадей ледяных массивов, которые подвержены не только межгодовой, но и климатической изменчивости. Прохождение трассы и работа судов в водах Российской Арктики должны быть безопасными как для них, так и для экологии региона. Эти два аспекта ледовой навигации могут быть обеспечены хорошим знанием ледовых условий на трассе и способностью судна преодолевать льды без аварий. Для выполнения гидрографических работ необходимо иметь сведения о ледовых условиях не только на трассе перехода в район работ, но и на акватории самого района.

Поскольку стоит задача сделать проход по трассе СМП круглогодичным на всем пути, то особую актуальность приобретает использование всех возможных источников информации о толщине морского льда, которые могут помочь в гидрометеорологическом и навигационном обеспечении. Использование данных Cryosat-2, SMOS и их комбинации Cryosat-2 & SMOS может помочь в комплексном анализе всей доступной информации при обеспечении надежного доступа к арктическим ресурсам. Искомые спутниковые продукты демонстрируют соответствие толщинам морского льда Карского моря, в основном на основании модального критерия, что согласуется с предыдущими исследованиями [18], и могут быть использованы при разных типах ледовых условий [32]: легкий (SMOS, Cryosat-2 & SMOS), средний (Cryosat-2, SMOS, Cryosat-2 & SMOS), тяжелый (Cryosat-2, Cryosat-2 & SMOS).

Конфликт интересов. У авторов нет конфликта интересов.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания ИВЭП СО РАН (рег. № 121031200178-8) при финансовой поддержке Российского Центра освоения Арктики (г. Салехард, Россия).

Благодарности. Авторы выражают благодарность В.М. Смоляницкому за консультации при работе с объектами портала ААНИИ. Обработка данных CryoSat-2 (толщина льда) финансируется Министерством экономики и энергетики Германии (грант: 50EE1008). Обработка данных SMOS и CryoSat-2 & SMOS (толщина льда) финансируется проектом ESA SMOS & CryoSat-2 Sea Ice Data Product Processing and Dissemination Service. Для получения данных за период 01.10.2010 — 30.04.2018 использован портал <https://www.meereisportal.de>, последний доступ: 01.08.2022 (грант: REKLIM-2013-04)

Competing interests. The authors have no competing interests.

Funding. This work was carried out within the framework of the Research Program of IWEP SB RAS (Project 121031200178-8) and funded by Russian Center for Arctic Development (Salekhard, Russia).

Acknowledgments. The authors wish to express their thanks to Vasily M. Smolyanitsky for expert advice in working with objects of the AARI portal. The processing of CryoSat-2 (sea ice thickness) data is funded by the German Ministry of Economic Affairs and Energy (grant: 50EE1008). The production of the SMOS sea ice thickness data and the combination of CryoSat-2 and SMOS data were funded by the ESA project SMOS & CryoSat-2 Sea Ice Data Product Processing and Dissemination Service. Data from 01.10.2010 to 30.04.2018 was obtained from <https://www.meereisportal.de> (grant: REKLIM-2013-04).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гудкович З.М., Карклин В.П., Ковалев Е.Г., Смоляницкий В.М., Фролов И.Е. Изменения морского ледяного покрова и других составляющих климатической системы в Арктике и Антарктике в связи с эволюцией полярных вихрей // Проблемы Арктики и Антарктики. 2008. № 1 (78). С. 48–58.
2. Walsh J.E., Fetterer F., Stewart J.S., Chapman W.L. A database for depicting Arctic sea ice variations back to 1850 // Geographical Review. 2017. V. 107 (1). P. 89–107. doi: 10.1111/j.1931-0846.2016.12195.x.
3. IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2021. 2391 p. doi: 10.1017/9781009157896.
4. Kwok R. Arctic sea ice thickness, volume, and multiyear ice coverage: Losses and coupled variability (1958–2018) // Environ. Res. Lett. V. 13. 105005. doi: 10.1088/1748-9326/aae3ec.
5. Lindsay R., Schweiger A. Arctic sea ice thickness loss determined using subsurface, aircraft, and satellite observations // The Cryosphere. 2015. V. 9 (1). P. 269–283. doi:10.5194/tc-9-269-2015.
6. Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Смоляницкий В.П., Клячкин С.В., Фролов С.В. Морской лед // Методы оценки последствий изменений климата для физических и биологических систем. М.: Росгидромет, 2012. С. 400–429.

7. Афанасьева Е.В., Алексеева Т.А., Соколова Ю.В., Демчев Д.М., Чуфарова М.С., Быченков Ю.Д., Девятаев О.С. Методика составления ледовых карт ААНИИ // Российская Арктика. 2019. № 7. С. 5–20.

8. Moon T.A., Druckenmiller M.L., Thoman R.L. Eds. Arctic Report Card 2021. National Oceanic and Atmospheric Association 2021. URL: <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/34308> (дата обращения: 16.08.2022).

9. Tschudi M.A., Stroeve J.C., Stewart J.S. Relating the Age of Arctic Sea Ice to its Thickness, as Measured during NASA's ICESat and IceBridge Campaigns // Remote Sensing. 2016. V. 8 (6). P. 457. doi: 10.3390/rs8060457.

10. Zygmuntovska M. Arctic sea ice altimetry — Advances and current uncertainties. PhD thesis. Bergen: University of Bergen. 2014: 90 p.

11. Thoman R. L.; J. Richter-Menge and M.L. Druckenmiller, Eds. Arctic Report Card 2020. National Oceanic and Atmospheric Association 2020. URL: <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/27827> (дата обращения: 16.08.2022).

12. Ricker R., Hendricks S., Helm V., Skourup H., Davidson M. Sensitivity of CryoSat-2 Arctic sea-ice freeboard and thickness on radar-waveform interpretation // The Cryosphere. 2014. V. 8. P. 1607–1622. doi: 10.5194/tc-8-1607-2014.

13. Tian-Kunze X., Kaleschke L., Maaß N., Mäkinen M., Serra N., Drusch M., Krumpen T. SMOS-derived thin sea ice thickness: algorithm baseline, product specifications and initial verification // The Cryosphere. 2014. V. 8 (3). P. 997–1018. doi: 10.5194/tc-8-997-2014.

14. Ricker R., Hendricks S., Kaleschke L., Tian-Kunze X., King J., Haas C. A weekly Arctic sea-ice thickness data record from merged CryoSat-2 and SMOS satellite data // The Cryosphere. 2017. V. 11. P. 1607–1623. doi: 10.5194/tc-11-1607-2017.

15. Экологическая ценность и уязвимость зоны кромки льда / Ред. Сесилие Х. фон-Квильфельт // Краткий отчет Норвежского полярного института № 47. 2018. 286 с. URL: https://www.barentsportal.com/documents/MIZ_RU.pdf (дата обращения: 16.08.2022).

16. Ronkainen I., Lehtiranta J., Lensu M., Rinne E., Haapala J., Haas C. Interannual sea ice thickness variability in the Bay of Bothnia // The Cryosphere. 2018. V. 12. P. 3459–3476. doi: 10.5194/tc-12-3459-2018.

17. Смоляницкий В.М., Торяков А.Б., Фильчук К.В., Фролов И.Е. Сравнительный анализ прямых измерений толщин льда и высот снега, наблюдений Cryosat-2 и численных оценок системы PIOMAS // Проблемы Арктики и Антарктики. 2020. Т. 66. № 3. С. 337–348. doi: org/10.30758/0555-2648-2020-66-3-337-348.

18. Belter H.J., Krumpen T., Hendricks S., Hoelemann J., Janout M.A., Ricker R., Haas C. Satellite-based sea ice thickness changes in the Laptev Sea from 2002 to 2017: comparison to mooring observations // The Cryosphere. 2020. V. 14. P. 2189–2203. doi: 10.5194/tc-14-2189-2020.

19. Sea ice nomenclature. Terminology and codes // WMO. № 259. V. 1. Geneva, 2017. doi: 10.25607/OBP-1515.

20. Карклин В.П., Хотченков С.В., Юлин А.В., Смоляницкий В.М. Сезонные изменения возрастного состава льдов в северо-восточной части Карского моря в осенне-зимний период // Проблемы Арктики и Антарктики. 2016. № 4 (110). С. 41–50.

21. Карклин В.П., Хотченков С.В., Юлин А.В., Смоляницкий В.М. Формирование возрастного состава льда в юго-западной части Карского моря в осенне-зимний период // Проблемы Арктики и Антарктики. 2017. № 3 (113). С. 16–26. doi: 10.30758/0555-2648-2017-0-3-16-26.

22. Richter-Menge J., Druckenmiller M.L., Jeffries M. Eds. 2019: Arctic Report Card 2019. URL: <https://arctic.noaa.gov/Report-Card/Report-Card-2019/ArtMID/7916/ArticleID/837/About-Arctic-Report-Card-2019> (дата обращения: 16.08.2022).

23. Атлас ледяных образований / Под общей редакцией В.М. Смоляницкого. СПб.: ААНИИ, 2019. 232 с.
24. Gray L., Burgess D., Copland L., Langley K., Gogineni P., Paden J., Leuschen C., van As D., Fausto R., Joughin I., Smith B. Measuring Height Change Around the Periphery of the Greenland Ice Sheet With Radar Altimetry // *Frontiers in Earth Science*. 2019. V. 7. P. 1–14. doi: 10.3389/feart.2019.00146.
25. Schröder D., Feltham D.L., Tsamados M., Ridout A., Tilling R. New insight from CryoSat-2 sea ice thickness for sea ice modelling // *The Cryosphere*. 2019. V. 13. P. 125–139. doi: 10.5194/tc-13-125-2019.
26. Ricker R., Kauker F., Schweiger A., Hendricks S., Zhang J., Paul S. Evidence for an Increasing Role of Ocean Heat in Arctic Winter Sea Ice Growth // *Journal of Climate*. 2021. V. 34 (13). P. 5215–5227. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0848.1>.
27. Wang X., Key J., Kwok R., Zhang J. Comparison of Arctic Sea Ice Thickness from Satellites, Aircraft, and PIOMAS Data // *Remote Sensing*. 2016. V. 8 (9). P. 713. doi: 10.3390/rs8090713.
28. Hendricks S., Ricker R., Paul S. Product User Guide & Algorithm Specification: AWI CryoSat-2 Sea Ice Thickness (version 2.4), 2021. URL: <https://epic.awi.de/id/eprint/54733/> (дата обращения: 16.08.2022).
29. Duda R., Hart P. Pattern Classification and Scene Analysis. NY.: John Willey & Sons, 1973. 284 p.
30. Полякова В.В., Шаброва Н.В. Основы теории статистики. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. 148 с.
31. Реброва О.Ю. Статистический анализ медицинских данных. Применение пакета прикладных программ STATISTICA. М.: МедиаСфера, 2002. 312 с.
32. Иванов Р.В., Полубелов Д.А., Соболева А.А. Характеристика ледовых условий работы гидрографических судов в Карском море // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. 2018. Т. 10. № 6. С. 1211–1224. doi: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1211-1224.

REFERENCES

1. Gudkovich Z.M., Karklin V.P., Kovalev Ye.G., Smolyanitsky V.M., Frolov I.E. Changes of sea ice cover and other climatic system components in the Arctic and the Antarctic related to evolution of polar eddies. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2008, 1 (78): 48–58. [In Russian].
2. Walsh J.E., Fetterer F., Stewart J.S., Chapman W.L. A database for depicting Arctic sea ice variations back to 1850. *Geographical Review*. 2017, 107 (1): 89–107. doi: 10.1111/j.1931-0846.2016.12195.x.
3. IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2021: 2391 p. doi: 10.1017/9781009157896.
4. Kwok R. Arctic sea ice thickness, volume, and multiyear ice coverage: Losses and coupled variability (1958–2018). *Environmental Research Letters*. 2018, 13: 105005. doi: 10.1088/1748-9326/aae3ec.
5. Lindsay R., Schweiger A. Arctic sea ice thickness loss determined using subsurface, aircraft, and satellite observations. *The Cryosphere*. 2015, 9 (1): 269–283. doi: 10.5194/tc-9-269-2015.
6. Frolov I.E., Gudkovich Z.M., Karklin V.P., Smolianitskii V.P., Kliachkin S.V., Frolov S.V. Sea ice. Methods for assessing the effects of climate change on physical and biological systems. Moscow: Rosgidromet, 2012: 400–429. [In Russian].

7. Afanasieva E.V., Alekseeva T.A., Sokolova J.V., Demchev D.M., Chufarova M.S., Bychenkov Yu.D., Devyataev O. S. Methodology for compiling ice maps of the AARI. *Rossiyskaja Arktika*. Russian Arctic. 2019, 7: 5–20. doi: 10.24411/2658-4255-2019-10071.
8. Moon T.A., Druckenmiller M.L., Thoman R.L. Eds. Arctic Report Card 2021. National Oceanic and Atmospheric Association 2021. Available at: <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/34308> (accessed 16.08.2022).
9. Tschudi M.A., Stroeve J.C., Stewart J.S. Relating the age of Arctic Sea ice to its thickness, as measured during NASA's ICESat and IceBridge campaigns. *Remote Sensing*. 2016, 8 (6): 457. doi: 10.3390/rs8060457.
10. Zygmuntovska M. Arctic sea ice altimetry — Advances and current uncertainties. PhD thesis. Bergen: University of Bergen, 2014: 90 p.
11. Thoman R. L.; J. Richter-Menge and M.L. Druckenmiller, Eds. Arctic Report Card 2020. National Oceanic and Atmospheric Association 2020. Available at: <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/27827> (accessed 16.08.2022).
12. Ricker R., Hendricks S., Helm V., Skourup H., Davidson M. Sensitivity of CryoSat-2 Arctic sea-ice freeboard and thickness on radar-waveform interpretation. *The Cryosphere*. 2014, 8: 1607–1622. doi: 10.5194/tc-8-1607-2014.
13. Tian-Kunze X., Kaleschke L., Maaß N., Mäkinen M., Serra N., Drusch M., Krumpen T. SMOS-derived thin sea ice thickness: algorithm baseline, product specifications and initial verification. *The Cryosphere*. 2014, 8 (3): 997–1018. doi: 10.5194/tc-8-997-2014.
14. Ricker R., Hendricks S., Kaleschke L., Tian-Kunze X., King J., Haas C. A weekly Arctic sea-ice thickness data record from merged CryoSat-2 and SMOS satellite data. *The Cryosphere*. 2017, 11: 1607–1623. doi: 10.5194/tc-11-1607-2017.
15. Sesilie Kh. fon-Kvil'fel't. *Kratkii otchet Norvezhskogo poliarnogo instituta*. Summary report of the Norwegian Polar Institute. 2018, 47: 286 p. Available at: https://www.barentsportal.com/documents/MIZ_RU.pdf (accessed 16.08.2022). [In Russian].
16. Ronkainen I., Lehtiranta J., Lensu M., Rinne E., Haapala J., Haas C. Interannual sea ice thickness variability in the Bay of Bothnia. *The Cryosphere*. 2018, 12: 3459–3476. doi: 10.5194/tc-12-3459-2018.
17. Smolyanitsky V.M., Turyakov A.B., Filchuk K.V., Frolov I.E. Comparison of direct measurements of sea ice thickness and snow height, CryoSat-2 observations and PIOMAS numerical estimates. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2020, 66 (3): 337–348. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-3-337-348>. [In Russian].
18. Belter H.J., Krumpen T., Hendricks S., Hoelemann J., Janout M.A., Ricker R., Haas C. Satellite-based sea ice thickness changes in the Laptev Sea from 2002 to 2017: comparison to mooring observations. *The Cryosphere*. 2020, 14: 2189–2203. doi: 10.5194/tc-14-2189-2020, 2020.
19. Sea ice nomenclature. Terminology and codes. WMO. № 259. V. 1. Geneva, 2017. doi: 10.25607/OBP-1515
20. Karklin V.P., Hotchenkov S.V., Yulin A.V., Smolyanitsky V.M. Seasonal changes in the stages of sea ice development in northeast part of the Kara sea during the autumn and winter period. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2016, 110 (4): 41–50. [In Russian].
21. Karklin V.P., Hotchenkov S.V., Yulin A.V., Smolyanitsky V.M. Formation of the stages of sea ice development composition in the south-western part of the Kara sea during autumn-winter season. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2017, 113 (3): 16–26. doi: 10.30758/0555-2648-2017-0-3-16-26. [In Russian].
22. Richter-Menge J., Druckenmiller M.L., Jeffries M. Eds. 2019: Arctic Report Card 2019. Available at: <https://arctic.noaa.gov/Report-Card/Report-Card-2019/ArtMID/7916/ArticleID/837/About-Arctic-Report-Card-2019> (accessed 16.08.2022).

23. *Atlas ledjanyh obrazovanij*. Ed. V. Smolyanitsky. Atlas of ice formations. Ed. V. Smolyanitsky. St. Petersburg: Arctic and Antarctic Research Institute, 2019: 232 p. [In Russian].
24. Gray L., Burgess D., Copland L., Langley K., Gogineni P., Paden J., Leuschen C., van As D., Fausto R., Joughin I., Smith B. Measuring height change around the periphery of the Greenland Ice Sheet with radar altimetry. *Frontiers in Earth Science*. 2019, 7: 1–14. doi: 10.3389/feart.2019.00146.
25. Schröder D., Feltham D.L., Tsamados M., Ridout. A., Tilling R. New insight from CryoSat-2 sea ice thickness for sea ice modelling. *The Cryosphere*. 2019, 13: 125–139. doi: 10.5194/tc-13-125-2019.
26. Ricker R., Kauker F., Schweiger A., Hendricks S., Zhang J., Paul S. Evidence for an increasing role of Ocean heat in Arctic winter sea ice growth. *Journal of Climate*. 2021, 34 (13): 5215–5227. doi: 10.1175/JCLI-D-20-0848.1.
27. Wang X., Key J., Kwok R., Zhang J. Comparison of Arctic Sea Ice Thickness from Satellites, Aircraft, and PIOMAS Data. *Remote Sensing*. 2016, 8 (9):713. doi: 10.3390/rs8090713.
28. Hendricks S., Ricker R., Paul S. Product User Guide & Algorithm Specification: AWI CryoSat-2 Sea Ice Thickness (version 2.4). 2021. URL: <https://epic.awi.de/id/eprint/54733/> (дата обращения: 16.08.2022).
29. Duda R., Hart P. Pattern Classification and Scene Analysis. NY.: John Willey & Sons, 1973: 284 p.
30. Poliakova V.V., Shabrova N.V. *Osnovy teorii statistiki*. Fundamentals of Statistical Theory. Ekaterinburg: Izdatel'stvo Ural'skogo universiteta, 2015: 148 p. [In Russian].
31. Rebrova O.Iu. *Statisticheskij analiz medicinskih dannyh. Primenenie paketa prikladnyh programm STATISTICA*. Statistical analysis of medical data. Application of the STATISTICA application package. Moscow: MediaSfera, 2002: 312 p. [In Russian].
32. Ivanov R.V., Polubelov D.A., Soboleva A.A. Ice condition features of hydrographic vessels for work in the Kara Sea. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*. Bulletin of the State University of the Sea and River Fleet named after Admiral S. O. Makarov. 2018, 10 (6): 1211–1224. doi: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1211-1224. [In Russian].

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-1-29-43>

УДК 551.46.062.1



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

**К решению проблемы прогноза уровня моря
у мыса Каменный в Обской губе**

Г.Н. Войнов¹, Н.В. Головин¹, Н.В. Кубышкин^{2}, М.Ю. Кулаков¹,
А.А. Скутин¹, К.Г. Смирнов¹, О.В. Хаймина³*

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

² — ООО «Арктик Шельф Консалтинг», Санкт-Петербург, Россия

³ — Российский государственный гидрометеорологический университет,
Санкт-Петербург, Россия

**kuba@arctic-shelf.com*

Резюме

Проблема краткосрочного прогнозирования уровня моря в районе мыса Каменный Обской губы актуализировалась с началом функционирования Новопортовского терминала круглогодичной отгрузки нефти («Ворота Арктики»). Краткосрочный прогноз уровня необходим для танкеров, осуществляющих транспортировку нефти, для прохождения относительно мелководного участка, расположенного к северу от терминала. Для оперативного контроля уровня непосредственно в районе мыса Каменный организованы круглогодичные ежечасные наблюдения с использованием буйковых уровнемеров со спутниковым каналом передачи данных. Результаты гармонического анализа наблюдений за уровнем в районе м. Каменный за 2016–2021 гг. показали как существенную сезонную изменчивость амплитуд и фаз волны M_2 в годовом цикле, так и их межгодовую изменчивость, обусловленную различными ледовыми условиями Обской губы (легкие, средние, тяжелые). С учетом этих результатов краткосрочный прогноз суммарного уровня строится путем сложения предвычисленного с учетом сезонной изменчивости прилива и расчетных значений непериодических колебаний, получаемых в ходе гидродинамического моделирования с использованием трехмерной гидродинамической модели совместной циркуляции вод и льдов AARI-IOCM. Ежечасные наблюдения за уровнем в районе мыса Каменный и прогноз уровня для обеспечения мореплавания осуществляются с 2017 г. и продолжают в настоящее время.

Ключевые слова: наблюдения за уровнем моря, Обская губа, прогноз уровня, сезонная изменчивость прилива.

Для цитирования: Войнов Г.Н., Головин Н.В., Кубышкин Н.В., Кулаков М.Ю., Скутин А.А., Смирнов К.Г., Хаймина О.В. К решению проблемы прогноза уровня моря у мыса Каменный в Обской губе // Проблемы Арктики и Антарктики. 2023. Т. 69. № 1. С. 29–43. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-1-29-43>.

Поступила 01.12.2022

После переработки 27.01.2023

Принята 31.01.2023

Approach to solving the problem of sea level forecasting off Cape Kamenny in the Ob' Bay

Gennadiy N. Voinov¹, Nikolay V. Golovin¹, Nickolay V. Kubyshkin^{2*},
Mikhail Yu. Kulakov¹, Andrey A. Skutin¹, Konstantin G. Smirnov¹,
Olga V. Khaimina³

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

² — “Arctic Shelf Consulting” LLC, St. Petersburg, Russia

³ — Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia

*kuba@arctic-shelf.com

Summary

The problem of short-term sea level forecasting in the area of Cape Kamenny in the Ob' Bay has become important since the Novoportovskiy terminal (known as “Arctic Gate”) began operating for year-round oil shipment. The tankers loading the oil from the terminal have to pass through relatively shallow waters, located to the north, limiting the vessels draft. Thereby a short-term water level forecast is required relative to the lowest theoretical level for tankers loading at the terminal. The year-round hourly observations using buoy level gauges with a satellite channel of data transmission are organized for quick level monitoring directly in the area of Cape Kamenny. The results of the harmonic analysis of water level observations in the area of Cape Kamenny for 2016–2021 showed significant seasonal variability of amplitudes and phases of the wave M_2 in the annual cycle, as well as their interannual variability due to various ice conditions of the Ob' Bay (light, medium, heavy). Based on these results, the processing and analysis of observations data over the last month are performed by the end of each month. According to these results, the current values of harmonic constants, dependent on actual ice conditions are specified and calculation of the tide is carried out for the next month. The calculation of the forecast values of the total level is composed of calculated tide and short term (with a lead time of up to 5 days) forecast of non-periodic level fluctuations using the three-dimensional hydrodynamic model of joint water and ice circulation AARI-IOCM. At the final stage of the forecast preparation, the predicted level, usually calculated relative to the conditional long term average annual value, is bound to the lowest theoretical level (according to the current values of the level gauge) and transferred to the operator of the terminal and to the tanker. The hourly observations of water level in the area of Cape Kamenny and level forecasting have been carried out since 2017 and are still continuing.

Keywords: forecasting of sea level, Ob' Bay, sea level observations, seasonal variability of the tide.

For Citation: Voinov G.N., Golovin N.V., Kubyshkin N.V., Kulakov M.Yu., Skutin A.A., Smirnov K.G., Khaimina O.V. Approach to solving the problem of sea level forecasting off Cape Kamenny in the Ob' Bay. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2023, 69 (1): 29–43. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-1-29-43>.

Received 01.12.2022

Revised 27.01.2023

Accepted 31.01.2023

ВВЕДЕНИЕ

Круглогодичная навигация из Мурманска к мысу Каменный Обской губы была начата с введением в эксплуатацию Новопортовского терминала отгрузки нефти (2015 г.), получившего название «Ворота Арктики» (рис. 1). При этом танкерам, вывозящим нефть Новопортовского месторождения, приходится проходить участок губы с глубинами 10–11 м, что ограничивает их загрузку. Этот участок расположен в 3–20 милях к северу от м. Каменный; из-за его наличия приходится следить, чтобы осадка груженого танкера позволяла осуществлять безопасный проход, при том,

Рис. 1. Новопортовский терминал круглогодичной отгрузки нефти. Фото Н.В. Головина

Fig. 1. Novoportovskiy terminal of the year-round oil loading. Photo by N.V. Golovin

что фактические глубины на данном участке могут меняться с изменением уровня воды. Согласно лощи [1], величина прилива в районе м. Каменный достигает 0,6 м (в сизигию), размах суммарных колебаний с учетом сгонно-нагонных явлений здесь может доходить до 2,2 м. Это требует регулярного обеспечения судоходства данными по уровню и прогнозными оценками изменения уровня на несколько часов вперед, за которые груженный танкер дойдет от терминала до мелководного участка и преодолеет его.

Ближайшие к рассматриваемому району наблюдения за уровнем на сети Росгидромета выполняются в Новом Порту — в 100 км от Новопортовского терминала (рис. 2). При такой удаленности уровенного поста его данные не являются репрезентативными для терминала и участка с пониженными глубинами. К тому же наблюдения за уровнем в Новом Порту срочные (4 раза в сутки), что недостаточно для оперативного обеспечения мореплавания.

Еще одной особенностью краткосрочного прогнозирования уровня в районе м. Каменный является большая изменчивость прилива между летним и зимним периодами из-за влияния ледяного покрова в Обской губе на движение приливной волны.

Первые ежечасные круглогодичные наблюдения за уровнем с помощью СУМ на Каменном выполнялись в 1947–1949 гг. Северной

Рис. 2. Обская губа

Fig. 2. Ob' Bay



Портоизыскательской экспедицией Главсевморпути. Эти данные были обработаны выборочно гармоническим анализом по методу Дарвина А.В. Коптевой и опубликованы в [2, 3]. Также в работе [4] была представлена другая версия обработки гармоническим анализом по методу Дарвина полумесячных серий. Конечно, оценки констант прилива, полученные из полумесячных серий, были неустойчивыми и давали большой разброс, но все же была обнаружена очень большая изменчивость прилива между летним и зимним периодами. Это были первые качественные оценки влияния ледяного покрова в Обской губе на движение приливной волны.

Вследствие мелководности района у м. Каменный капитальные сооружения для измерения уровня не были построены, и наблюдения выполнялись до XXI в. по рейке футштока на свайном посту. Полная оценка качества этих наблюдений и методика обработки и анализа изложена в [5].

В XXI в. эпизодические наблюдения за уровнем у м. Каменный проводились в ходе морских экспедиций АМИГЭ и ААНИИ с помощью современных измерительных устройств, устанавливаемых автономно. С 2017 г., как сказано выше, в этом районе осуществляются круглогодичные ежечасные наблюдения.

Современное обобщение данных гидрологического режима Обской и Тазовской губ выполнено в монографии [6], где даны характеристики режима неперiodических и приливных колебаний уровня в Обской губе для периода середины и конца XX в. Особенности режима приливных и сгонно-нагонных колебаний уровня воды в районе м. Каменный по историческим и современным данным представлены в работе [5]. Но в этой работе не освещались наблюдения за уровнем за период 2016–2021 гг.

Целью данной статьи является демонстрация подхода к прогнозированию колебаний уровня моря у м. Каменный с учетом сезонной изменчивости прилива в сочетании с измерениями в реальном времени и гидродинамическим прогнозом неперiodических колебаний уровня. Для представления особенностей развития приливных колебаний уровня в годовом цикле у м. Каменный и демонстрации важности их учета данные ежечасных наблюдений за 2016–2021 гг. были обработаны гармоническим анализом по методу наименьших квадратов (МНК) по версии ААНИИ [5]. Результаты анализа месячных серий обрабатывались по авторским программам также с целью получения оценок сезонного хода основных волн прилива.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для проведения наблюдений за уровнем моря непосредственно в районе м. Каменный в феврале 2017 г. был развернут ведомственный буйковый уровеньный пост, на котором выполняются ежечасные измерения. Обслуживание поста осуществляется гидрологами ООО «Арктик Шельф Консалтинг», находящимися на береговой базе компании, обеспечивающей функционирование Новопортовского терминала (на момент написания данной статьи оператором является ООО «Онего Шиппинг Лтд»). Ежечасные данные по уровню оперативно передаются компании-оператору (относительно наинизшего теоретического уровня — НТУ) и ежесуточно в Северное УГМС в Архангельск (в БСВ-77 — Балтийской системе высот 1977 г.), в зоне ответственности которого находится ведомственный пост.

Буйковый вариант измерений выбран из-за сложности организации стационарного поста в районе м. Каменный, где из-за плавного увеличения глубин датчик уровня необходимо выносить достаточно далеко от береговой линии (не менее 1 км), чтобы избежать его вмержания в лед в зимнее время, а наличие периодов дрейфа льда при

формировании и разрушении ледяного покрова не позволяет использовать для передачи данных на берег надежную кабельную линию без ее защиты от воздействия льда.

В качестве основного измерителя уровня выбраны буйковые уровнемеры WLG-30 производства ООО «Марлин-Юг», расположенного в г. Севастополе. Данные уровнемеры представляют собой легкие заякоренные буи с размещенным в районе якоря измерительным блоком с датчиком гидростатического давления [7]. Измерительный блок кабелем соединен с буйком, внутри которого находятся датчик атмосферного давления, модем спутниковой связи и другие элементы измерительной системы (блок питания, датчик температуры и пр.). Изначально передача данных осуществлялась по спутниковому каналу ARGOS, но в последние годы производитель перешел на канал Iridium. Данные с уровнемера поступают в течение 5 минут на специализированный геопортал, созданный в ААНИИ для сбора, обработки и анализа гидрометеорологической и ледовой информации в режиме реального времени. Уровнемеры в ледовый сезон устанавливаются на припайном льду с фиксацией буйка на поверхности льда, в безледный период функционируют в основном режиме, при котором заякоренный буй плавает на поверхности воды. В переходные сезоны первичного ледообразования, формирования ледяного покрова, а также весеннего таяния и разрушения льда буйковые уровнемеры приходится переустанавливать во избежание их утраты при дрейфе льда. Уровнемеры переносятся с основных рабочих точек, расположенных на глубинах около 10 м, ближе к берегу: на первичный припай осенью, в прибрежные закраины весной. В случае невозможности безопасного использования в наиболее критичные периоды применяются дополнительные приборы (радиоуровнемеры), а также проводятся визуальные наблюдения с переносной гидрологической рейкой. Необходимость периодической переустановки приборов приводит к тому, что для буйковых наблюдений в районе м. Каменный не существует постоянного нуля поста. Привязка данных к БСВ-77 выполняется при каждой переустановке приборов нивелированием относительно береговых реперов.

Прогнозные оценки уровня требуются танкеру, стоящему под погрузкой для определения его осадки в грузу, при которой он безопасно пройдет мелководный участок. При отсутствии регламента обеспечения гидрометеорологической информацией Новопортовского терминала (официально он является районом порта Сабетта, расположенного более чем в 300 километрах от м. Каменный) заблаговременность прогнозных оценок уровня определялась из соображений разумной достаточности для отходящих от терминала танкеров. Практика быстро показала, что первоначально планируемая заблаговременность 4–6 часов, требуемая для прохода мелководного участка, недостаточна, поскольку не учитывает время на принятие решения по количеству принимаемой танкером нефти, от которого зависит осадка судна. В результате определился следующий порядок предоставления информации: дважды в сутки в установленные сроки гидрологи передают оператору терминала мареограмму с ходом уровня за суточный интервал, предшествующий текущему сроку, и кривой ожидаемого хода уровня на 12 часов вперед (прогнозная оценка). По запросу танкера может быть подготовлен дополнительный уточненный прогноз в любой требуемый срок наблюдений, не совпадающий со сроками предоставления регулярной информации.

Для определения прогнозируемого уровня моря применяется комбинированный метод, объединяющий оперативные наблюдения за уровнем, расчет неперiodических

колебаний уровня с использованием трехмерной гидродинамической модели, разработанной в ААНИИ, и предвычисление приливных колебаний по методике Г.Н. Войнова.

Модельный расчет неперiodических колебаний уровня

Для разработки прогнозов сгонно-нагонных колебаний уровня моря в районе м. Каменный используется технология расчета и краткосрочного прогноза уровня моря и течений в Северном Ледовитом океане и его морях на основе трехмерной гидродинамической модели совместной циркуляции вод и льдов AARI-IOCM [8]. Эта технология в 2013 г. была одобрена Центральной методической комиссией Росгидромета по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) и рекомендована для использования в оперативной работе.

Модель AARI-IOCM, являющаяся ядром технологии, представляет собой результат объединения трех моделей: трехмерной бароклинной модели циркуляции вод, модели дрейфа ледяного покрова и термодинамической модели морского льда. Модель адаптирована ко всей акватории СЛО и прилегающей акватории Атлантического океана и имеет пространственное разрешение 13,8 км. Для описания донной топографии и конфигурации береговой черты использован архив GEBCO. В качестве граничных условий используются среднемесячные среднесезонные значения расходов 17 основных рек, впадающих в Северный Ледовитый океан. Температура и соленость воды из World Ocean Atlas (WOA05) [9] для летнего или зимнего периодов взяты в качестве начальных условий. В качестве внешнего атмосферного форсинга используются данные глобальной гидродинамической модели Global Forecast System (GFS) [10] с горизонтальным пространственным шагом $0,5 \times 0,5^\circ$ и временным дискретом 3 часа. В работах [8, 11–13] было показано, что AARI-IOCM достаточно хорошо воспроизводит ледовые условия и циркуляцию вод и льдов в Северном Ледовитом океане.

При производстве краткосрочных прогнозов уровня моря термодинамический блок модели не задействован, а информация о сплоченности морского льда обновляется еженедельно в автоматическом режиме. Источником информации о состоянии ледяного покрова на целевой акватории служит продукция Центра ледовой гидрометеорологической информации (ЦЛГМИ) ААНИИ. Ледовые карты еженедельно поставляются центром в формате Sea Ice Grid (SIGRID-3), который является приклад-

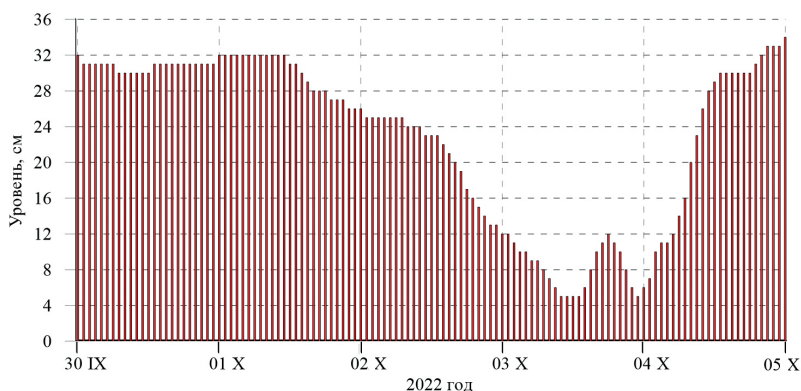


Рис. 3. Прогноз колебаний уровня по модельным расчетам в районе м. Каменный

Fig. 3. Forecast of level fluctuations according to model calculations in the Cape Kamenny area

ным расширением формата хранения векторной графической информации Shapefiles. В оперативном режиме работы информация о ледовой обстановке обрабатывается в соответствии с временным регламентом деятельности ЦЛГМИ, данные в формате SIGRID-3 усваиваются моделью после каждого обновления, выпускаемого центром.

Технология расчета и краткосрочного прогноза уровня моря и течений в Северном Ледовитом океане и его морях поддерживает весь цикл: от проведения предварительной обработки исходных данных до оформления полученных результатов расчетов в согласованном виде выходной продукции и отправления прогностических значений потребителю.

По результатам расчетов ежедневные значения уровня моря предоставлялись в виде таблиц в формате Excel и графиков в формате bmp. Для примера на рис. 3 представлен график прогноза колебаний уровня моря, выпущенный 30 сентября 2022 г.

Анализ сезонной изменчивости и предвычисление приливов

Предвычисление приливов для м. Каменный основывается на гармоническом анализе годовых и месячных серий наблюдений за уровнем. Этапы обработки и анализа данных по уровню зависят от задач исследования. Для изучения мезомасштабных неприливных колебаний гармонический анализ с использованием МНК производится по материалам наблюдений с той дискретностью, какая получена прибором. Для исследования приливных колебаний уровня этапы обработки следуют стандартной схеме, изложенной ниже.

На первом этапе обработки выполняется контроль случайных ошибок. Для ежедневных временных рядов колебаний уровня моря нами разработан способ контроля и редакции случайных выбросов [14]. Этот контроль производится по остаточному ряду (наблюдения минус предвычисления). В практике гармонического анализа приливов для полного завершения обработки необходим анализ остаточного ряда (наблюдения минус предвычисления). Анализ остаточной кривой необходим и потому, что только способа контроля выбросов недостаточно для обнаружения многих других скрытых ошибок и брака. К ним относятся различные сбои в работе измерительного устройства, ошибки при нивелировке нуля поста и т. д. При этом хорошие результаты для идентификации сомнительных участков дает совместный просмотр наблюдаемой и предвычисленной кривых колебаний уровня. После замены на предвычисления выявленных сомнительных участков, а также пропусков (если они есть) производится повторный гармонический анализ.

Далее ежедневные временные ряды подвергались фильтрации фильтром нижних частот (Гровза) для подавления влияния непериодических колебаний. С целью устранения срезки при фильтрации (48 значений ряда теряется) временные ряды предварительно дополнялись в начале и конце рядов с помощью предвычисления. Затем по полученным временным рядам производился гармонический анализ приливов с помощью МНК по методике, разработанной в ААНИИ [14].

В целом из каждой месячной серии было выделено 32 волны. В классе суточных приливов выделены 6 волн ($Q_1, O_1, M_1, K_1, J_1, OO_1$), полусуточных — 8 волн ($\mu_2, N_2, M_2, L_2, S_2, MNS_2, MSN_2, 2SM_2$), 1/3-суточных — 4 волны (M_3, MO_3, MK_3, SK_3), 1/4-суточных — 5 волн ($MN_4, M_4, SN_4, MS_4, S_4$), 1/5-суточных — 2 волны ($2MP_5, MSK_5$), 1/6-суточных — 5 волн ($2MN_6, M_6, MSN_6, 2MS_6, 2SM_6$), 1/8-суточных — 1 волна (M_8).

Дополнительно 9 второстепенных волн (2-е приближение) были получены из основных приливов K_1, μ_2, N_2, S_2 в результате разделения по теоретическим соотношениям соответственно $\pi_1, S_1, \psi_1, \phi_1, P_1, 2N_2, v_2, K_2, T_2, R_2$. Используемый автором

список волн близок к классической работе Дудсона. Однако по Дудсону можно выделить по месячной серии 2 волны долгопериодного прилива — MS_f и M_m . Но наш практический опыт позволяет утверждать, что достоверную оценку этих приливов можно получить только из годовых серий наблюдений.

По Фурье-анализу остаточных рядов (наблюдения минус предвычисления) были рассчитаны средние уровни шума, средние квадратические отклонения в классах приливов и по ним определены 95 % доверительные интервалы для оценки точности.

При наличии многолетних наблюдений возникает возможность статистической обработки результатов анализа месячных серий. По этому массиву информации для амплитуд и фаз (углов положений) всех основных волн прилива на каждый месяц определяются средние оценки, максимумы и минимумы, средние квадратические отклонения (СКО). Оценка сезонной изменчивости амплитуд и фаз основных волн производится по известным выражениям [14].

Сезонный ход амплитуды представлен в виде относительного изменения (dH) ее средней величины (H) как $dH = (H_M - H_T)/H_M$ (в процентах), где H_M — среднее векторное значение из всех серий за данный месяц, а H_T — среднее векторное за весь период. Сезонный ход фазы (dg) дан в виде отклонения средней величины из всех серий за данный месяц от средней за весь период $dg = (g_M - g_T)$. СКО (σ) для амплитуды и фазы рассчитывались по формулам ошибок векторного среднего. Для этого средняя оценка и отдельные месячные значения амплитуды и фазы преобразовывались в компоненты $H \cdot \cos g$ и $H \cdot \sin g$. По ним рассчитывалась стандартная ошибка для амплитуды σH , и затем для фазы $\sigma G = \sigma H/H$ (рад):

$$\sigma H = \left[\sigma_A^2 \cdot (\cos g)^2 + \sigma_B^2 \cdot (\sin g)^2 \right]^{1/2},$$

где σ_A — СКО для компоненты $H \cdot \cos g$, а σ_B — СКО для компоненты $H \cdot \sin g$.

$$H = \left\{ (H \cdot \cos g)^2 + (H \cdot \sin g)^2 \right\}^{-1/2},$$

$$\tan(g) = H \cdot \sin g / H \cdot \cos g.$$

По этим формулам были получены средние месячные оценки и их изменения от месяца к месяцу в годовом цикле. Эти оценки для волны M_2 в пункте м. Каменный Обской губы представлены в таблице.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Сезонный ход прилива

В таблице даны оценки среднего сезонного хода констант прилива волны M_2 за периоды 1977–1994 и 2016–2021 гг. на м. Каменный.

Из данных табл. следует, что за период 1977–1994 гг. наибольшее гашение прилива ледяным покровом в среднем наблюдалось в апреле, а максимальное развитие прилива происходило в августе. В настоящее время происходит более раннее развитие прилива, и максимальная амплитуда наступает в июле, а наибольшее гашение прилива в среднем сместилось к марту.

Сопоставление оценок сезонного хода амплитуд прилива волны M_2 в годовом цикле за 6 лет за период 2016–2021 гг. показывает особенности, которые присутствуют в оценках сезонного хода за исторический период 1977–1994 гг., а также такие черты, которые не наблюдались ранее. Общим для обоих периодов является большая изменчивость параметров прилива за январь–май в годовом цикле и, наоборот, слабая изменчивость амплитуд в июле–октябре.

Оценки средних векторных значений сезонного хода относительных амплитуд (dH) и разности фаз (dg) волны M_2 на м. Каменный

Table

Estimations of mean vector values of seasonal changes of relative amplitudes (dH) and difference of phases (dg) of the wave M_2 at the Cape Kamenny

Месяц	1977–1994 гг.				2016–2021 гг.			
	dH , %	СКО	dg , град	СКО	dH , %	СКО	dg , град	СКО
I	–30,3	0,51	26,4	5,4	–49,4	2,0	34,5	23,8
II	–27,0	0,55	35,2	5,6	–49,5	2,3	40,1	27,9
III	–49,7	0,68	51,5	10,0	–53,8	1,5	50,2	19,7
IV	–50,0	0,82	55,6	12,1	–50,5	1,9	45,0	23,0
V	–46,5	0,82	55,4	11,3	–42,0	2,6	46,8	27,3
VI	–13,4	0,51	15,2	4,4	8,5	4,1	2,9	22,9
VII	66,8	1,03	–5,3	4,6	116,2	1,0	–12,5	2,7
VIII	149,1	0,57	–25,3	1,7	110,0	1,1	–17,1	3,3
IX	114,3	0,63	–22,5	2,2	88,8	1,4	–15,3	4,4
X	87,0	0,33	–18,3	1,3	69,8	1,1	–15,2	4,0
XI	–31,3	0,36	13,0	3,8	0,9	1,1	0,2	6,8
XII	–24,8	0,47	20,5	4,7	–46,2	1,0	25,8	11,3

Данные таблицы показывают значительное изменение средних месячных величин прилива за исторический и современный периоды. Они касаются как самих амплитуд и фаз, так и величин их среднеквадратических отклонений. Здесь надо учитывать различие баз данных: за период 1977–1994 гг. использовались срочные измерения уровня по рейке. Эти наблюдения не всегда имели хорошее качество и были приведены к однородным рядам. Вследствие этой процедуры происходит некоторое уменьшение величин разброса. Однако общие особенности обоих периодов остаются подобными. В годовом цикле СКО амплитуд и фаз в разы больше в январе–мае, а в июле–октябре величины СКО гораздо меньше и остаются приближенно на одном уровне. Очевидно, что такие особенности в развитии прилива в годовом цикле связаны с изменениями в развитии ледяного покрова в Обской губе в январе–мае и с отсутствием такового в июле–октябре.

Результаты анализа показывают очень большие межгодовые девиации сезонного хода констант волны M_2 в зимний период с января по май. На рис. 4 (а, б) показаны кривые сезонного хода средних месячных оценок амплитуд и фаз волны M_2 , средних за 2016–2021 гг. (норма) и в годы 2017 и 2021 их экстремального хода в годовом цикле. Для наглядности значения даны в нормированном виде от их значений в летний период (июль или август). Из рис. 4а видно, что в норме в январе–мае амплитуда составляет всего 0,23–0,28 от ее значения в июле, а фаза в марте возрастает на 62° . Это означает, что полная вода в марте запаздывает на 2,1 ч по сравнению с июлем. В июле–октябре изменчивость амплитуд находится в интервале 1,0–0,8, а фаз — 0 – 5° .

Обратимся к сезонному ходу констант волны M_2 в экстремальные годы. В 2017 г. в январе–мае наблюдались наибольшие значения амплитуд волны M_2 в интервале соответственно 5,1–8,6 см за этот период. В 2021 г. отмечались наименьшие значения амплитуд в январе–мае, которые составили всего 2,7–3,5 см в эти месяцы. Такие малые значения среднемесячных значений амплитуд волны M_2 не наблюдались и за исторический период 1977–1994 гг. В отношении фазы волны M_2 отмечаются аналогичные

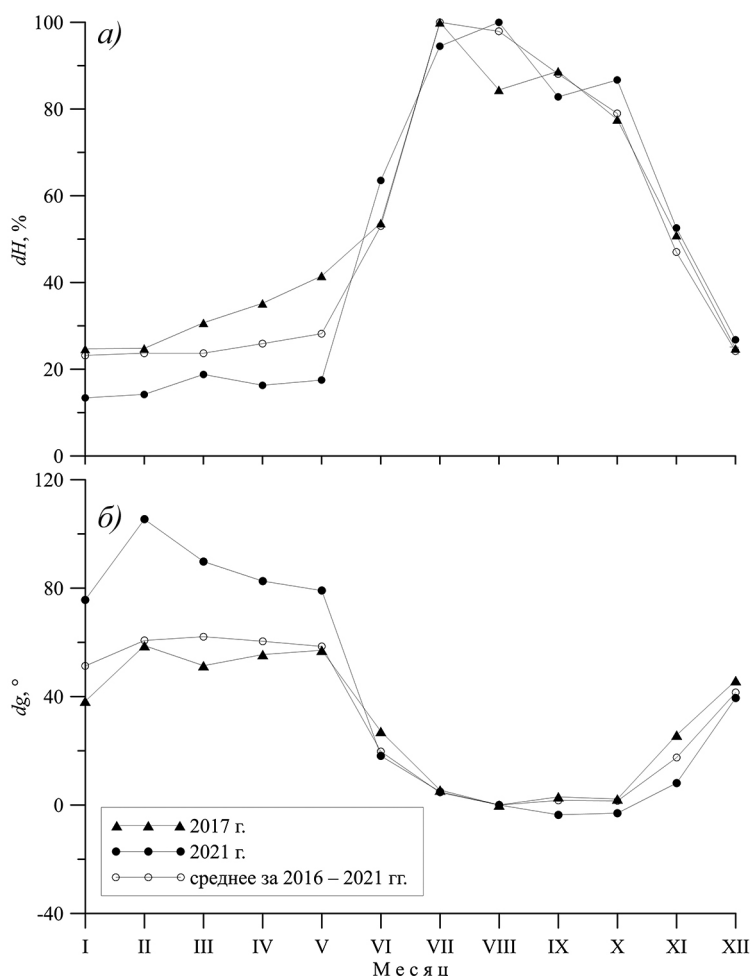


Рис. 4. Кривые сезонного хода нормированных средних месячных оценок амплитуд и фаз волны M_2 : амплитуды (а) и фазы (б)

Fig. 4. Curves of seasonal changes of average month amplitude estimates and wave phases M_2 : amplitude (a) and phase (b)

особенности, но с обратным результатом. При увеличении амплитуды наблюдается более раннее наступление прилива в сравнении с нормой (фаза уменьшается), а при уменьшении амплитуды происходит запаздывание полной воды прилива (фаза увеличивается). При этом даже для экстремальных лет в годовом цикле за июнь–октябрь значения оценок амплитуд и фаз близки к норме. Радикальные различия с нормой для аномальных 2017 и 2021 гг. наблюдаются в зимний период в январе–мае.

Например, в 2017 г. в январе–мае амплитуда волны M_2 не превышала 0,13–0,17 от ее значения в августе, а фаза изменялась от 349° до 7° , с максимумом в феврале, равным 9° . В 2021 г. значения амплитуды в январе–мае достигали соответственно 0,25–0,42 от таковой величины в июле, а фаза колебалась в диапазоне 29 – 33° , с максимумом в феврале, равным 59° . То есть по времени прилив (полная вода) наступил в феврале

2021 г. на 1,7 ч позже, чем в феврале 2017 г. Понятно, что приведенный здесь характер изменчивости сезонного хода в экстремальные годы однозначно определялся особенностями развития ледовых условий в Обской губе. Действительно, в 2021 г. наблюдались тяжелые ледовые условия, а в 2017 г. — легкие ледовые условия [15]. Аномальное поведение прилива и констант волны M_2 в зимний период в 2017 и 2021 гг. по своим характеристикам перекрывает аналогичные сведения за весь исторический период начиная с 1947 г. Особенно интересовал вопрос об интерпретации необычного гашения прилива в 2021 г.: связано ли это явление с локальными эффектами при прохождении приливной волны в районе м. Каменный (влияние ледового канала, гряд торосов, стамух) или оно имеет универсальный характер. Сведения о приливах, полученные в то же время в других районах Обской губы (в районах Геофизического и Салмановского месторождений), подтвердили и там аномальное гашение прилива в зимний период.

Выше было отмечено, что такие особенности в развитии прилива в годовом цикле связаны с изменениями в развитии ледяного покрова в Обской губе в январе–мае и с отсутствием такового в июле–октябре. Вопрос о влиянии ледяного покрова на приливную волну требует дальнейшей самостоятельной разработки, и здесь мы его касаемся в самых общих чертах.

В зимний период под влиянием ледяного покрова под припаем развивается подледный пограничный слой и происходит гашение и торможение приливной волны, а следовательно, и величины прилива, и, соответственно, величины скоростей приливных течений. Максимальный эффект этого процесса проявляется в апреле–мае, когда толщина припайного льда достигает максимума.

В работе [16] по данным наблюдений за течениями в Енисейском заливе был сделан интересный вывод о пороговом, критическом значении глубины моря в плане ее влияния на развитие приливных течений под припаем. Заметное влияние припайного льда обнаруживается на глубинах менее 25 м. Примечательно, что такое же значение для возникновения в течении волны M_2 градиентно-вязкого режима получено теоретически в работе [17]. Глубина моря в 12–13 м является критической глубиной. Физический механизм этого явления обусловлен резким усилением диссипации энергии за счет смыкания приледного и придонного пограничных слоев воды. По данным наблюдений за приливными течениями в работе [16] были рассчитаны элементы гашения и запаздывания приливной волны в Енисейском заливе, составившие на каждые 100 км пути под припаем соответственно 26 % и 24°.

Прогноз суммарного уровня

Прогноз непериодических колебаний уровня и предвычисление приливов традиционно выполняются относительно условного среднееголетнего уровня моря. Для практического использования судоводителям необходим уровень относительно глубин, представленных на навигационных картах и планшетах, т. е. относительно НТУ. Привязка прогностических и предвычисленных значений уровня к НТУ осуществляется гидрологами, обслуживающими уровеньный пост на Каменном: из фактического уровня вычитается прилив, после чего к нему привязывается прогноз сгонно-нагонных колебаний, рассчитанный по гидродинамической модели AARI-ЮСМ. Результирующий прогноз суммарного хода уровня получается добавлением прилива, предвычисленного по методике Г.Н. Войнова. Пример мареограммы с прогнозом уровня на 12 ч вперед, подготовленный для оператора Новопортовского терминала, приведен на рис. 5.

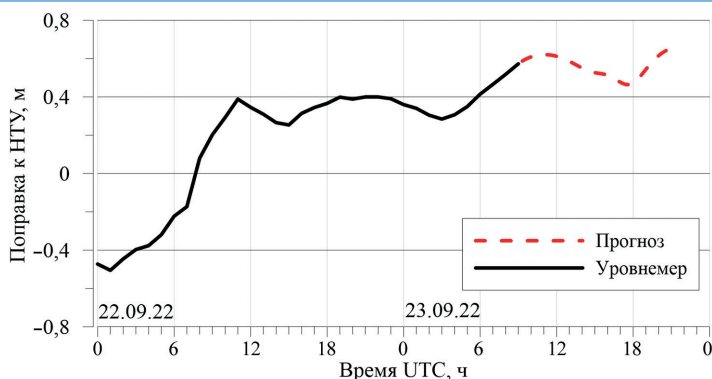


Рис. 5. Фактический уровень и прогнозная оценка с заблаговременностью 12 ч для Новопортовского терминала

Fig. 5. Actual level and forecast estimate with 12 hours lead time for the Novoportovskiy terminal

Оценка ошибки прогноза суммарного уровня выполнена путем сравнения фактических и прогнозируемых значений. При заблаговременности прогноза 12 часов вероятность того, что ошибка прогнозируемого уровня не превысит 5 см, составила 0,44; не превысит 10 см — 0,74; 15 см — 0,81; 20 см — 0,85; 25 см — 0,93. При этом следует учитывать, что разрешение датчика давления буйкового уровнемера в пересчете на метрическую шкалу составляет 2 см, а абсолютная погрешность измерения уровня составляет ± 10 см.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Новые результаты гармонического анализа наблюдений за уровнем моря в Обской губе в районе м. Каменный за 2016–2021 гг. показали существенное различие с историческими сведениями о приливных колебаниях уровня. Сравнение значений средних месячных оценок амплитуд и фаз прилива волны M_2 за 2016–2021 гг. с аналогичными значениями за период 1977–1994 гг. свидетельствует о значимых расхождениях как в целом в поведении кривых сезонного хода амплитуд и фаз волны M_2 в годовом цикле, так и значений оценок средних за каждый месяц в зимний и летний периоды.

Это означает, что для расчета приливов в районе м. Каменный нецелесообразно пользоваться средними годовыми или средними месячными гармоническими константами прилива на всем годовом цикле. В январе–июне необходимо подстраиваться под конкретный ход развития прилива по данным наблюдений и каждый месяц корректировать список констант волн. В практике предвычисления приливов для Новопортовского терминала это реализуется следующим образом. К концу каждого месяца выполняются обработка и анализ данных наблюдений за последний месяц, по результатам которого уточняются текущие значения гармонических постоянных, зависящие от фактических ледовых условий, и производится расчет прилива на следующий месяц. Следует заметить, что в различные периоды ледового сезона влияние ледовых условий на прилив может проявляться по-разному. Если в начале сезона прилив показывает значения, соответствующие легкому или, например, тяжелому типу ледовых условий, то в последующие месяцы он может перестроиться, например, на средний тип.

Повышение точности прогноза может быть достигнуто как за счет совершенствования наблюдений непосредственно на м. Каменный (путем сооружения стационарного уровня поста с постоянным нулем глубин), так и за счет организации системы мониторинга уровня в Обской губе с открытием ежечасных наблюдений в порту Сабетта, населенных пунктах Тадибеяха и Сеяха. Все данные должны быть доступны в режиме реального времени для оперативного анализа.

Конфликт интересов. У авторов исследования нет конфликта интересов.

Финансирование. При подготовке статьи использованы результаты, полученные в рамках хозяйственных работ (договор № 17/12-01 от «17» декабря 2021 г. между ООО «Онего Шиппинг Лтд» и ООО «Арктик Шельф Консалтинг», договор № 137060/2022 от 28 декабря 2021 года между ООО «Арктик Шельф Консалтинг» и ФГБУ «ААНИИ»), а также в ходе выполнения проекта 5.1.1 плана НИТР Росгидромета на 2020–2024 гг.

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

Funding. In preparing the article the authors used the results obtained within the framework of the contractual works (contract №17/12-01 dated December 17, 2021 between “Onego Shipping Ltd” LLC and “Arctic Shelf Consulting” LLC, contract № 137060/2022 dated December 28, 2021 between “Arctic Shelf Consulting” LLC and FSBI “AARI”) and in the course of project 5.1.1 of the Roshydromet R&D works plan for 2020–2024.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лочия Обь-Енисейского района Карского моря. СПб.: ГУНиО, 1993. 312 с.
2. Коптева А.В. Уровень и течения Обской губы // Труды АНИИ. 1953. Т. 59. С. 84–148.
3. Коптева А.В., Бутенко А.К., Иванова З.К. Материалы по изучению приливов арктических морей СССР // Труды АНИИ. 1952. Т. 42. Вып. VII. Карское море. 536 с.
4. Диесперова Р.А. Приливы Северного Ледовитого океана // Труды ГОИН. 1954. Вып. 19. 74 с.
5. Войнов Г.Н., Пискун А.А. Приливные и сгонно-нагонные колебания уровня воды в районе м. Каменный (Обская губа) // Проблемы Арктики и Антарктики. 2019. Т. 65. № 1. С. 15–33.
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) / Под ред. д-ра геогр. наук Г.Н. Войнова. СПб.: Нестор-История, 2017. 192 с.
7. Измеритель уровня воды (уровнемер) WLG-30. URL: https://marlin-yug.com/assets/files/pdf_ru/water_level_gauge_wlg-30_ru.pdf (дата обращения: 10.03.2023).
8. Кулаков М.Ю., Махитас А.П., Шутилин С.В. ААРИ–ИОСМ — совместная модель циркуляции вод и льдов Северного Ледовитого океана // Проблемы Арктики и Антарктики. 2012. № 2 (92). С. 6–18.
9. World Ocean Atlas 2005 (WOA05). URL: http://www.node.noaa.gov/OC5/WOA05/pr_woa05.html (дата обращения: 10.03.2023).
10. The National Centers for Environmental Prediction (NCEP). URL: <ftp.ncep.noaa.gov/pub/data/nccf/com/gfs/prod> (дата обращения: 10.03.2023).
11. Кулаков М.Ю. О новом подходе к моделированию циркуляции вод арктических морей // Проблемы Арктики и Антарктики. 2012. № 2 (92). С. 55–62.
12. Кулаков М.Ю., Махитас 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.

13. Кулаков М.Ю., Макситас А.П. Роль дрейфа льда в формировании ледяного покрова Северного Ледовитого океана в начале XXI века // Проблемы Арктики и Антарктики. 2013. № 2 (96). С. 67–75.
14. Войнов Г.Н. Приливные явления и методология их исследований в шельфовой зоне арктических морей (на примере Карского и северо-восточной части Баренцева морей): Автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. СПб., 2003. 46 с.
15. Тарасенко А.Д., Селюжонок 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.
16. Войнов Г.Н. Приливные течения арктических морей // Труды ААНИИ. 1988. Т. 128. 238 с.
17. Зырянов В.Н., Решетков А.Б. Остаточный вдольбереговой перенос водных масс приливным течением на мелководье // Океанология. 1999. Т. 39. № 3. С. 328–338.

REFERENCES

1. *Lociya Ob'-Enisejskogo rajona Karskogo morya*. GUNiO, 1993: 312 p. [In Russian].
2. Kopteva A.V. Level and currents of the Ob' Bay. *Trudy AANII*. Proc. of AARI. 1953, 59: 84–148. [In Russian].
3. Kopteva A.V., Butenko A.K., Ivanova Z.K. Materials for the study of tides in the arctic seas of the USSR. *Trudy AANII*. Proc. of AARI. 1952, 42 (issue VII. Kara Sea): 536 p. [In Russian].
4. Diesperova R.A. Tides of the Arctic Ocean. *Trudy GOIN*. Proc. of GOIN. 1954, 19: 74 p. [In Russian].
5. Voinov G.N., Piskun A.A. Tidal and storm surges water level fluctuations at the Cape Kamenny area (Ob' Bay). *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2019, 1 (65): 15–33. [In Russian].
6. Voinov G.N., Nalimov Yu.V., Piskun A.A., Stanovoy V.V., Usankina G.E. *Osnovnye cherty gidrologicheskogo rezhima Obskoi i Tazovskoi gub (led, urovni, struktura vod)*. Main characteristics of the hydrological regime of the Ob' Bay and Taz Bay (ice, levels, water structure). St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2017: 192 p. [In Russian].
7. *Izmeritel' urovnia vody (urovner) WLG-30*. Water level meter (level gauge) WLG-30. Available at: https://marlin-yug.com/assets/files/pdf_ru/water_level_gauge_wlg-30_ru.pdf (accessed 10.03.2023).
8. Kulakov M.Yu., Makshtas A.P., Shutilin S.V. AARI–IOCM — coupled ice-ocean circulation model for the Arctic Ocean. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2012, 2 (92): 6–18. [In Russian].
9. World Ocean Atlas 2005 (WOA05). Available at: http://www.node.noaa.gov/OC5/WOA05/pr_woa05.html (accessed 10.03.2023).
10. The National Centers for Environmental Prediction (NCEP). Available at: <ftp.ncep.noaa.gov/pub/data/nccf/com/gfs/prod> (accessed 10.03.2023).
11. Kulakov M.Yu. About the new approach to modelling of water circulation of the Arctic Seas. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2012, 2 (92): 55–62. [In Russian].
12. Kulakov M.Yu., Makshtas A.P., Shutilin S.V. Modelling estimations of sensitivity of the Arctic Ocean ice cover to changes of forcings. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2012, 3 (93): 66–74. [In Russian].
13. Kulakov M.Yu., Makshtas A.P. The role of ice drift in formation of sea ice cover in the Arctic Ocean at the beginning of XXI century. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2013, 2 (96): 67–75. [In Russian].

14. Voinov G.N. *Prilivnye iavleniia i metodologiia ikh issledovani v shel'fovoi zone arkticheskikh morei (na primere Karskogo i severo-vostochnoi chasti Barentseva morei)*. Tides and methodology of their researches in the shelf zone of the Arctic seas (using the example of the Kara Sea and north-east part of the Barents Sea). Dr. geographical sci. thesis. St. Petersburg, 2003: 46 p. [In Russian].
15. Tarasenko A.D., Selyuzhenok V.V., Sandalyuk N.V., Abramova I.A., Demchev D.M. Study of sea ice regime in the Ob' Bay using modern satellite data in 2007–2017. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2022, 1 (68): 48–63. [In Russian].
16. Voinov G.N. Tidal currents of the Arctic Seas. *Trudy AANII*. Proc. of AARI. 1988, 128: 238 p. [In Russian].
17. Zyryanov V.N., Reshetkov A.B. Along shore residual transport of water masses by tidal current in shallow water. *Okeanologiya*. Oceanology. 1999, 3 (39): 328–338. [In Russian].

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-1-44-57>
УДК 551.467



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

Оценки некоторых физико-механических характеристик льда Обской губы

О.М. Андреев^{1}, Н.В. Головин¹, Н.А. Крупина¹, Н.В. Кубышкин²,
А.А. Скутин¹, А.В. Чернов¹*

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

² — ООО «Арктик Шельф Консалтинг», Санкт-Петербург, Россия

**andoleg@aari.ru*

Резюме

Ледяной покров Обской губы формируется в зоне смешения морских и пресных вод, и изучению особенностей ряда характеристик такого льда посвящено данное исследование. Рассмотрены физико-механические характеристики ровного льда Обской губы по данным полевых исследований, проведенных за последние 30 лет. Приведены сведения по температуре льда в течение всего ледового сезона, показано изменение солёности льда в губе с географической широтой, даны оценки плотности и пористости льда. Проведен анализ соответствия натурных данных по прочности образцов пресного льда при одноосном сжатии с приложением нагрузки параллельно поверхности ледяного покрова с оценками прочности, рекомендованными нормативными и методическими руководствами. Результаты, полученные в ходе анализа прочностных характеристик льда Обской губы, при необходимости могут быть использованы в практических целях.

Ключевые слова: Обская губа, плотность льда, прочность льда, солёность льда, температура льда, физико-механические свойства льда.

Для цитирования: Андреев О.М., Головин Н.В., Крупина Н.А., Кубышкин Н.В., Скутин А.А., Чернов А.В. Оценки некоторых физико-механических характеристик льда Обской губы // Проблемы Арктики и Антарктики. 2023. Т. 69. № 1. С. 44–57. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-1-44-57>.

Поступила 27.01.2023

После переработки 28.02.2023

Принята 01.03.2023

Estimates of certain physical and mechanical characteristics of ice in the Ob' Bay

Oleg M. Andreev^{1}, Nikolay V. Golovin¹, Nina A. Krupina¹,
Nikolay V. Kubyshkin², Andrey A. Skutin¹, Alexey V. Chernov¹*

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

² — “Arctic Shelf Consulting” LLC, St. Petersburg, Russia

*andoleg@aari.ru

Summary

The ice cover of the Gulf of Ob is formed in an extended zone, where the sea and fresh waters are mixed. This study aims to evaluate certain physical and mechanical characteristics of such ice. It examines data on a complex of physical and mechanical fast ice characteristics in the Ob' Bay, obtained in the course of field studies over the last 30 years. The total amount of data available to the team of authors exceeds 200 cores, sampled in the Ob' Bay (from Novy Port to the boundary between the Bay and the Kara Sea) in different years and in different months of the ice season.

Processed data on ice temperature are presented, as well as information on the evolution of integral ice temperature during ice season. The change of integral ice salinity in the Ob' Bay with geographic latitude is identified and shown, and the function approximating this change is given.

The estimates of average density and porosity of ice by thickness are presented. The effect of mineral inclusions on the increase in ice density is considered.

An analysis was carried out of the correspondence between the field data on fresh and saline ice sample strength in uniaxial compression (with the load application parallel to the ice cover surface) with theoretical strength estimates from Russian and foreign scientific and methodological literature, based on the data obtained on physical and mechanical ice characteristics in the Ob' Bay. A generalized estimate of the saline ice strength limit in the Ob' Bay, obtained in uniaxial compression parallel to the surface of ice accumulation is given, as well as its approximation by lognormal distribution.

The results obtained in the analysis of the strength characteristics of ice in the Gulf of Ob can be used for practical purposes. The results may also prove useful in terms of contribution to theoretical knowledge on the experimental mechanics of ice in desalinated water bodies.

Keywords: ice density, ice salinity, ice strength, ice temperature, Ob' Bay, physical and mechanical properties of ice.

For Citation: Andreev O.M., Golovin N.V., Krupina N.A., Kubyshkin N.V., Skutin A.A., Chernov A.V. Estimates of certain physical and mechanical characteristics of ice in the Ob' Bay. *Problemy Arktiki i Antarkтики*. Arctic and Antarctic Research. 2023, 69 (1): 44–57. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-1-44-57>.

Received 27.01.2023

Revised 28.02.2023

Accepted 01.03.2023

ВВЕДЕНИЕ

Исследованию ледяного покрова Обской губы посвящено большое количество публикаций. Большинство из них рассматривают вопросы наступления (сроков) основных ледовых фаз, положения границы припая и Обь-Енисейской заприпайной полыньи, толщины льда, торосистости ледяного покрова, дрейфа льда. Очень слабо освещена в литературе тема физико-механических свойств льда Обской губы, при том, что эта тема весьма актуальна в условиях активного хозяйственного освоения этого природного объекта. Обрывочные сведения по отдельным характеристикам комплекса физико-механических свойств льда можно встретить в работах [1, 2, 3 и др.]. К сожалению, приведенные в этих работах сведения недостаточны для того, чтобы сформировать у большого сообщества специалистов, работающих в Обской губе (управленцев, менеджеров нефтегазовых компаний, проектировщиков и строителей, моряков, научных сотрудников и пр.), правильное представление о том, насколько

лед в этом регионе по своим свойствам специфичен по сравнению со льдами внутренних водных объектов или шельфовой зоны других регионов России (по которым накоплен достаточно большой объем данных).

В научной литературе, посвященной ледяному покрову природных водоемов, сложилось разделение на пресноводные и морские льды. Для них выведены соответствующие корреляционные зависимости, связывающие соленость льда с его толщиной, прочностные характеристики с температурой, соленостью и плотностью льда (или определяемыми через них соотношениями фазового состава льда). Данные зависимости хорошо известны и приводятся в соответствующей нормативной литературе и руководящих документах. Ледяной покров Обской губы включает в себя пресноводные льды (низовья Оби, южная часть Обской губы и Тазовская губа), морские льды (граница Обской губы и Карского моря) и наименее изученные (наименее представленные в научной литературе) льды распресненных водоемов, ежегодно образующиеся в губе между пресноводными и морскими льдами на отрезке протяженностью в несколько сотен километров.

В рамках данного исследования будет проведен анализ всех имеющихся в распоряжении авторов данных о физико-механических характеристиках ледяного покрова на всем протяжении губы. Наиболее важны в данном аспекте сведения о прочностных характеристиках льда, максимальные значения которых определяют нагрузки на гидротехнические сооружения и суда, а минимальные — отвечают за возможность безопасного проведения хозяйственной деятельности на поверхности ледяного покрова. Таким образом, основной целью проводимого исследования является получение обоснованных оценок (или отыскание функциональных зависимостей) для некоторых физико-механических характеристик льда на акватории Обской губы.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Коллектив авторов располагает данными по более чем 200 кернам, отобраным в Обской губе (от Нового Порта до границы губы с Карским морем) в разные годы и в различные месяцы ледового сезона. В этих кернах определялись те или иные характеристики льда (температура, соленость, плотность, пределы прочности при различных нагрузках льда). Указанные керны отбирались в ходе специальных ледоисследовательских экспедиций, проводимых в Обской губе ААНИИ, АМИГЭ и другими организациями в течение более чем трех десятков лет (первый керн датируется апрелем 1987 г., последний — декабрем 2022 г.; ледоисследовательские работы на момент написания настоящей статьи продолжаются). Распределение ледоисследовательских станций с определением физико-механических характеристик льда по акватории губы представлено на рис. 1.

Заметим, что определение физико-механических характеристик льда не входит в состав стандартных ледовых наблюдений, осуществляемых на береговых гидрометеорологических станциях. Значительная часть данных получена в рамках хозяйственных проектов, в том числе в ходе инженерных изысканий и специальных исследований для проектирования и строительства гидротехнических объектов (порт Сабетта, Салмановский причал, Новопортовый терминал круглогодичной отгрузки нефти и др.), а также в процессе специализированного гидрометеорологического обеспечения транспортных и строительных операций. В большей части экспедиций авторы настоящей статьи принимали непосредственное участие, а в отдельных случаях — данные были получены от коллег по ледоисследовательским работам или

взяты из соответствующих архивных технических отчетов.

Важно, что все используемые нами для анализа данные были получены на припайном льду, который большую часть ледового сезона распространяется на всю ширину Обской губы в довольно значительной ее части: от морского края дельты Оби до южной границы заприпайной полыньи [2, 4], а также он устанавливается вдоль ямальского и гыданского берегов губы, образуя западную и восточную границы полыньи.

МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Температура льда

Ледяной покров представляет собой тонкую пластину, температура нижней границы которой равна температуре замерзания или таяния льда и меняется в течение ледового сезона весьма слабо. Температура верхней поверхности ледяной пластины определяется радиационным балансом, турбулентным теплообменом с атмосферой, толщиной снежного покрова и притоком тепла фазовых переходов из толщи льда. Несмотря на значительную меридиональную протяженность Обской губы (более 800 км), условия, определяющие температуру льда, можно признать до некоторой

степени однородными (по крайней мере на участке от Нового Порта до северной границы губы, на котором распределен массив рассматриваемых нами данных). Например, среднегодовые значения температуры воздуха по наблюдениям на ГМС Мыс Каменный, Тамбей и Дровяной различаются не более чем на 1 °С. Это позволяет нам объединить все имеющиеся данные по температуре льда для акватории Обской губы в единый массив и рассмотреть, как она меняется в течение ледового сезона.

Температура льда измерялась в кернах на горизонтах (обычно кратных 10 см) при помощи электронных термометров со щупом. Щуп термометра помещался в отверстие, высверленное ручной дрелью, а само сверло подбиралось под диаметр щупа, чтобы минимизировать зазор между измерительным элементом и льдом.



Рис. 1. Схема расположения ледоисследовательских станций в Обской губе

Fig. 1. Location scheme of ice research stations in the Ob' Bay

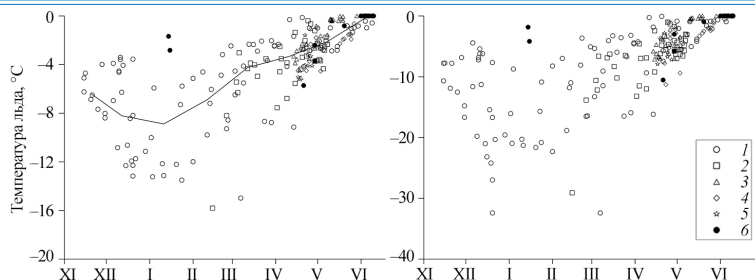


Рис. 2. Средняя по толщине температура льда в Обской губе (а) и минимальная температура льда в керне (б):

1 — в районе мыса Каменный, 2 — в районе Сабетты, 3 — Салмановское (Утреннее) НГКМ, 4 — в районе мыса Дровяной, 5 — в районе Геофизического НГКМ, 6 — другие районы, 7 — среднемесячные значения по всему объему данных

Fig. 2. Average ice temperature by thickness in the Ob' Bay (a) and minimum ice temperature in the core (b):

1 — in the area of the cape Kamenny, 2 — in the area of the Sabetta, 3 — Salmanovskoe (Utrennee) OGCF, 4 — in the area of the cape Drovyanoy, 5 — in the area of the Geofisicheskoe OGCF, 6 — other areas, 7 — average monthly values over the entire data volume

На рис. 2а представлен весь объем данных по средней по толщине температуре льда в Обской губе с ноября по июнь. На рис. 2б приведен аналогичный график для минимальных значений температуры в отобранных кернах, которые чаще всего регистрируются в верхнем слое ледяного покрова, но во время продолжительных оттепелей и весеннего прогрева льда могут смещаться в средний и даже в нижний слои льда. Последнее имеет место для периода таяния льда, когда большая часть ледяной толщи прогревается до нулевой температуры, а в нижнем слое температура льда еще близка к температуре замерзания соленой или солоноватой воды.

Средние даты начала устойчивого ледообразования в Обской губе относятся к октябрю, но возможность выхода на лед для определения его характеристик появляется только с установлением вдольберегового припая (в среднем конец октября — середина ноября). Временной интервал между средними датами образования припая (окончательного полного замерзания) по многолетним данным стационарных наблюдений (по оценкам, приведенным в [4]) составляет: между мысом Каменный и Тамбеем 5 суток, между мысом Каменный и полярной станцией Дровяная — 10 суток, т. е. вдольбереговой припай устанавливается достаточно быстро вдоль всего протяженного побережья губы (причем вдоль западного берега раньше, чем вдоль восточного). Наиболее ранние измерения температуры льда в нашей выборке датированы 15 ноября и выполнены в районе мыса Каменный. В середине ноября средняя по толщине температура льда уже достигает значений $-5...-6$ °C. Осредненная по всем имеющимся данным за вторую половину ноября средняя по толщине температура льда составила $-6,4$ °C; минимальное локальное значение температуры (поверхность льда) равно $-16,7$ °C.

Зимние месяцы отличаются не только самыми низкими температурами льда, но и наибольшей дисперсией значений (см. рис. 2). В это время толщина снега на льду сравнительно небольшая, встречаются участки совершенно без снега, из-за чего температура льда сильнее подвержена влиянию перепадов температуры воздуха, чем в весенний период. Температура поверхности льда с декабря по март

может опускаться ниже -30°C (абсолютный зарегистрированный минимум в Обской губе $-32,4^{\circ}\text{C}$), при этом средняя по толщине температура льда понижается до $-14\dots-16^{\circ}\text{C}$. Однако среднемесячные оценки средней по толщине температуры льда в течение всего ледового сезона выражаются однозначными значениями целой части (в декабре $-8,0^{\circ}\text{C}$, в январе $-8,9^{\circ}\text{C}$, в феврале $-7,5^{\circ}\text{C}$, а в марте уже наблюдается подъем до $-4,7^{\circ}\text{C}$).

На графиках (см. рис. 2) хорошо заметно, что наибольшая плотность точек приходится на вторую половину апреля — первую половину мая. Именно в это время проводится основная часть ледоисследовательских экспедиций, т. к. в этот период ледяной покров Обской губы достигает максимальной толщины, а также имеет место наиболее благоприятное для проведения полевых работ сочетание продолжительности светлого времени суток и температуры воздуха. Среднемесячная температура льда (средняя по толщине) в апреле составляет $-3,2^{\circ}\text{C}$, в мае $-1,7^{\circ}\text{C}$. Локальные минимумы температуры льда в первой половине мая обычно не опускаются ниже -10°C , а во второй половине стабильно выше -5°C .

В конце мая — начале июня лед в Обской губе практически каждый год равномерно прогрет до 0°C , при этом в отдельные годы вся толща ледяного покрова прогревается до околонулевых значений температуры уже в апреле.

Соленость льда

Обская губа является уникальным водным объектом — в течение ледового сезона здесь одновременно присутствуют пресные (пресноводные) льды и льды распресненных водоемов, а при определенных условиях образуются и морские льды. Соленость льда зависит от солености воды, скорости нарастания льда и процессов перераспределения солей в уже образовавшемся льду (к последним относят, в частности, опреснение льда со временем). Известно, что соленость льда в губе повышается от нулевых значений (на участке губы к югу от соединения с Тазовской губой) до значений, характерных для морского льда ($2\text{--}6\%$), на границе Обской губы и Карского моря. Данные многолетних натурных измерений солености льда насчитывают 60 кернов и позволяют получить некоторые оценки границы переходной зоны от пресных к морским льдам.

На рис. 3а представлено распределение средней по толщине солености льда S в Обской губе в зависимости от географической широты φ , а также кривая, аппроксимирующая это распределение, уравнение которой записывается в следующем виде:

$$S(\%) = \begin{cases} 0, & \varphi < 69,73^{\circ}\text{ ш.} \\ a_4\varphi^4 + a_3\varphi^3 + a_2\varphi^2 + a_1\varphi + a_0, & \varphi \geq 69,73^{\circ}\text{ ш.} \end{cases} \quad (1)$$

Значения коэффициентов a_i приведены в таблице.

Таблица

Значения коэффициентов a_i уравнения (1)

Table

The values of the coefficients a_i of equation (1)

Коэффициент	Значение
a_0	116701,3023
a_1	-6943,114389
a_2	154,8566946
a_3	-1,53457921
a_4	0,0057009416

Заметим, что аппроксимирующий полином столь высокой степени был выбран нами потому, что именно он наиболее плавно и с наибольшим коэффициентом детерминации (R^2) описывал полученное распределение солёности.

При перемещении с юга на север по графику (см. рис. 3а) видно, что средняя по толщине солёность льда в Обской губе начинает постепенно отличаться от нулевой уже на широте $(70,0-70,5)^\circ$ с. ш. По данным работы [4], в этом районе располагается в зимнее время граница пресных вод в Обской губе (с нулевой солёностью от поверхности до дна). Солёность воды в северной части губы меняется очень сильно как в течение года, так и в межгодовом рассмотрении. Она наименьшая в летние месяцы (всего несколько промилле), повышается осенью и достигает наибольших значений зимой (по данным ГМС Дровяная, в среднем до 16–19 ‰, но в отдельные годы может превышать 29 ‰ [4]). При этом в каждый отдельный ледовый сезон колебания солёности вод могут иметь свои особенности, отличные от приведенного общего характера процесса, что отражается на вертикальном распределении солёности льда. Например, в районе Сабетты включения пресного льда встречались во всех слоях ледяной толщи (в верхних, в средних и в нижних), а в отдельные годы не наблюдались совсем. Примеры вертикальных профилей солёности льда северной части Обской губы показаны на рис. 3б.

Для образования морского льда солёность воды должна быть более 24,7 ‰. Такая солёность воды в поверхностном слое далеко не каждый год отмечается в зимнем годовом максимуме солёности на границе Обской губы с Карским морем. На рис. 3а этому участку соответствуют точки значений солёности льда на широте $(72,5-72,7)^\circ$. Часть точек показывает пониженную солёность, другая часть вполне соответствует по солёности морскому льду. Минимальное значение средней по толщине солёности льда на данном участке (1,22 ‰) было зафиксировано в мае 1998 г. В мае 2005 г. солёность льда здесь была в пределах (2,9–3,8) ‰, в апреле 2010 г. — (3,7–5,1) ‰.

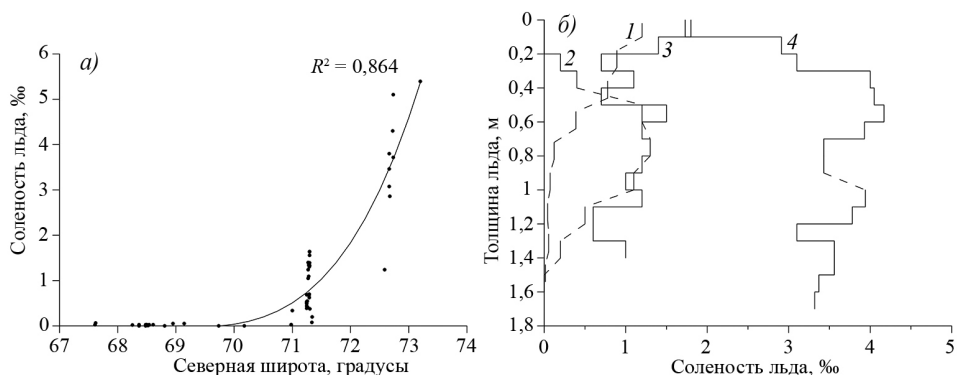


Рис. 3. Изменение средней по толщине солёности льда в Обской губе с географической широтой (а) и вертикальные профили солёности льда в северной части Обской губы (б): 1 — Сабетта, май 1998 г.; 2 — Сабетта, февраль 2011 г.; 3 — Сабетта, апрель 2013 г.; 4 — мыс Дровяной, май 2005 г.

Fig. 3. Change of the average ice salinity by thickness in the Ob' Bay with geographic latitude (a) and vertical profiles of ice salinity in the northern part of the Ob' Bay (b): 1 — Sabetta, May of 1998; 2 — Sabetta, February of 2011; 3 — Sabetta, April of 2013; 4 — cape Drovyanoy, May of 2005

Плотность льда

За рассматриваемый период (с 1987 г. по настоящее время) собрано более 100 кернов с измерением плотности льда на акватории от Нового Порта до границы губы с Карским морем. В 53 из них вместе с плотностью определялись температура и соленость льда, что позволяет оценить фазовый состав льда.

На рис. 4а приведена гистограмма значений средней по толщине плотности льда в Обской губе по всему объему имеющихся данных. Почти половина всех значений приходится на диапазон 890–910 кг/м³ (точнее, нижний и верхний квартили равны 886 и 909 кг/м³, медиана — 897 кг/м³).

Плотность льда определяется плотностью и количественным соотношением фазовых составляющих: чистого льда, рассола, воздушных включений, твердых минеральных и органических включений (при их наличии). Влияние на плотность льда первых трех компонент хорошо изучено и достаточно точно определяется расчетными методами при известных температуре и солености льда.

Количество жидкой фазы рассчитывается по температуре и солености льда [5–7]. Объем воздушных включений v_a обычно определяется по расчетной плотности льда $\rho_{TS} = f(T, S)$ и измеренной общей плотности льда ρ :

$$v_a(\%) = \frac{\rho_{TS} - \rho}{\rho} \cdot 100. \quad (2)$$

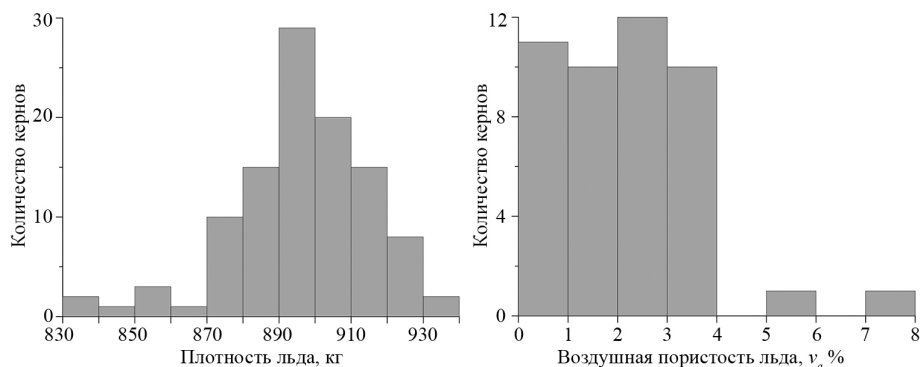


Рис. 4. Гистограммы значений средней по толщине плотности льда (а) и значений средней по толщине воздушной пористости льда (б) в Обской губе

Fig. 4. Histograms of values of average ice density by thickness (a) and average ice air porosity values by thickness (b) in the Ob' Bay

На рис. 4б приведена гистограмма распределения объема воздушных включений, рассчитанного по средним (по толщине льда) температуре, солености и плотности. За исключением единичных значений с $v_a > 5\%$, основной объем данных распределен почти равномерно в интервале $0\% < v_a < 4\%$.

В 15 % случаев измеренная плотность льда превышала соответствующие теоретические значения ρ_{TS} на 0,3–2,0 %. Это может быть связано как с погрешностью измерений (измерения физико-механических характеристик льда в полевых условиях редко бывают прецизионными), так и с игнорированием влияния твердых инородных включений, плотность которых выше плотности льда и рассола.

Вклад в общую плотность льда минеральных и органических включений в ходе полевых ледоисследовательских работ обычно оценивается только на качественном

уровне при описании текстуры льда: наличие включений, их размер и количество в терминах «редкие», «мало», «много» и т. п. В лучшем случае приводится субъективная визуальная оценка количества включений в процентах от объема рассматриваемого слоя льда, принятая «на глазок» специалистом, описывающим текстуру льда в кернах. Такие оценки не могут быть использованы для определения количества минеральных включений и их вклада в общую плотность льда. Между тем этот вклад может быть весьма значительным для ледяного покрова Обской губы, мутность воды в которой достаточно высока. Минеральные включения попадают в ледяной покров, вмержая в лед при непосредственном его контакте с грунтом или при замерзании воды, содержащей взвешенные частицы. По данным работ [8, 9], плотность глинистых илов, составляющих поверхностный слой донных грунтов — источник взвешенных частиц, составляет $(1,5-1,6) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ (во влажном состоянии), а плотность самих частиц — $2,65 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. Полагаем, что именно минеральные включения являются причиной повышения плотности практически пресного льда до значений 930 кг/м^3 и выше (см. рис. 4а). К сожалению, до внедрения в практику полевых ледоисследовательских работ точных лабораторных измерений количества и характеристик минеральных включений по слоям льда корректно оценить их влияние на плотность льда не представляется возможным.

Прочность льда

Прочность льда зависит от его температуры, солёности, пористости, структуры, наличия органических и минеральных включений, условий проведения испытаний: вида и скорости приложения нагрузки, формы и размера ледяных образцов, качества их подготовки к испытаниям и др. В частности, в работе [10] рассматривается влияние на результаты определения прочности льда трения и теплообмена между поверхностями образца и пластинами пресса. При большом количестве влияющих факторов измеренные значения прочности льда демонстрируют высокий разброс, и даже в одной серии испытаний пределы прочности образцов могут существенно различаться.

В рамках данной статьи рассмотрим прочность льда при одноосном сжатии при приложении нагрузки параллельно поверхности ледяного покрова (так называемое «параллельное», или «горизонтальное», сжатие). Такое направление соответствует условиям воздействия льда на сооружение с вертикальной стенкой.

Объём данных по прочности при параллельном сжатии пресного льда в Обской губе, имеющихся в распоряжении авторов, составляет 137 образцов, отобранных из разных слоев ровного льда. Еще 67 образцов, отобранные в северной части губы, относятся к солёному льду. Все образцы цилиндрической формы. Испытания на прочность выполнялись при рекомендуемой нормативными документами средней скорости деформации $\sim 10^{-4} \text{ 1/с}$.

Результаты испытаний пресного льда в виде облака точек представлены на рис. 5, связывающем прочность льда σ с температурой образцов T . На графике ожидаемо большой разброс значений предела прочности, тем не менее прослеживается тенденция его увеличения с понижением температуры льда. Рассмотрим, как данные полевых исследований согласуются с расчетными, представленными в научно-методической литературе.

Одним из наиболее проработанных отечественных исследований прочности льда в плане расчета пределов прочности по комплексу определяющих их факторов

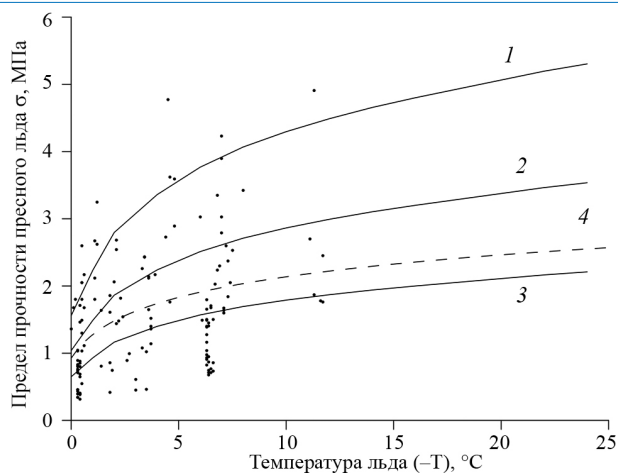


Рис. 5. Предел прочности пресного льда при одноосном сжатии параллельно поверхности ледяного покрова (перпендикулярно длинным осям структурных элементов):

1 — для льда призматической структуры [11, 12]; 2 — для льда шестовато-игольчатой структуры [11, 12]; 3 — для льда зернистой структуры [11, 12]; 4 — формула (3); точками отмечены данные полевых измерений в Обской губе

Fig. 5. Ice strength limit in uniaxial compression parallel to the ice cover surface (perpendicular to the long axis of the structural elements):

1 — for ice of prismatic structure [11, 12]; 2 — for ice with columnar-acicular structure [11, 12]; 3 — for ice of granular structure [11, 12]; 4 — formula (3); data of the field measurements in the Ob' Bay are marked with points

является работа [11], на основе которой было разработано методическое руководство по расчету прочности льда [12]. На рис. 5 нанесены три кривые пределов прочности при сжатии для различной структуры пресного льда, построенные по указаниям работ [11, 12] для условий параллельного сжатия без учета воздушной пористости льда и формы образцов (в [11, 12] прочность при сжатии приведена для ледяных кубиков с ребром 5 см). Теоретические кривые и данные полевых наблюдений достаточно хорошо согласуются с учетом большого разнообразия сочетаний кристаллических структур в ледяном покрове в естественных условиях. К сожалению, условия проведения полевых работ не позволяют четко указать структуру для большинства образцов, поскольку мы столкнулись с большим пространственным разнообразием структурных типов даже в пределах ледоисследовательской площадки, что, по-видимому, связано со сложным сочетанием условий ледообразования с точки зрения динамичности процессов (об этом же свидетельствует сложное чередование слоев прозрачного льда и льда с примесью песка и илов). В материалах исследований физико-механических характеристик ледяного покрова Обской губы встречаются все виды структуры льда, рассмотренные в работах [11, 12]. С учетом имеющихся материалов по строению льда, мы бы рекомендовали для расчетов прочности всей толщи ледяного покрова выбирать призматический тип структуры для участка губы южнее 70,0–70,5° с. ш., шестовато-игольчатый — между 70,0–70,5° с. ш. и 72° с. ш.

Следуя традиции логарифмического представления зависимости прочности льда от температуры, уравнение $\sigma = f(T)$, аппроксимирующее натурные данные по пределу прочности при горизонтальном сжатии пресного льда, представим в виде (кривая 4 на рис. 5):

$$\sigma \text{ (МПа)} = 0,5045 \cdot \ln(1 - T(^{\circ}\text{C})) + 0,9271. \quad (3)$$

Уравнение (3) показывает зависимость от температуры средней прочности льда при сжатии параллельно поверхности ледяного покрова без учета кристаллической структуры при естественном уровне пористости льда (см. выше), соответствует условиям хрупкого разрушения (скорости деформации $\sim 10^{-4}$ 1/с) цилиндрических образцов с диаметром основания 0,10–0,18 м (объемом $(1,6\text{--}5,1) \cdot 10^{-3}$ м³). Заметим, что при переходе от прочности цилиндрических образцов к прочности кубиков с гранью 0,05 м по методике [12] кривая 4 на рис. 5, рассчитанная по формуле (3), «поднимется» на графике выше примерно на 0,5–0,6 МПа.

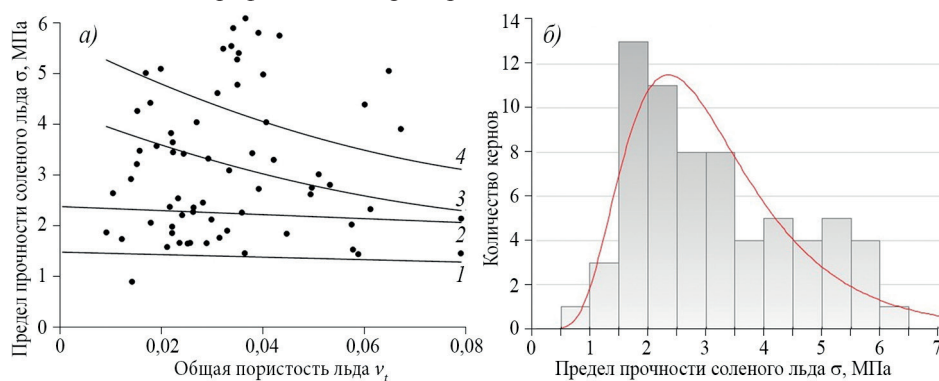


Рис. 6. Зависимость предела прочности соленого льда при одноосном сжатии параллельно поверхности ледяного покрова от общей пористости (а) и гистограмма значений предела прочности соленого льда при одноосном сжатии и аппроксимация ее логнормальным распределением (б)

1 — для льда зернистой структуры [11, 12]; 2 — для льда вертикально-ориентированной (волокнистой) структуры [11, 12]; 3 — для льда вертикально-ориентированной структуры [13]; 4 — для льда зернистой структуры [13]

Fig. 6. Dependence of saline ice strength limit in uniaxial compression parallel to the ice cover surface on total porosity (a) and histogram of values of saline ice strength limit in uniaxial compression and its approximation by lognormal distribution (b)

1 — for ice of granular structure [11, 12]; 2 — for ice of vertically-aligned (fibrous) structure [11, 12]; 3 — for ice of vertically-aligned structure [13]; 4 — for ice of granular structure [13]

На рис. 6а представлены результаты полевых измерений предела прочности при горизонтальном сжатии соленого льда и их сопоставление с расчетной прочностью по отечественным и зарубежным научно-методическим работам. Поскольку прочность соленого льда зависит как от температуры, так и от солености, удобнее ее рассматривать в зависимости от количества жидкой фазы (массы или объема), а наличие данных по плотности образцов льда позволяет учесть влияние на прочность льда суммарного объема рассола и воздушных включений v_t :

$$v_t = v_b + v_a. \quad (4)$$

Для представления данных полевых наблюдений в виде $\sigma = f(v_t)$ использована популярная методика расчета объемов фазовых компонент соленого льда по работе [6]; v_t на рис. 6а представлен в безразмерном виде (относительный объем).

Облако точек данных полевых наблюдений (см. рис. 6а) демонстрирует случайный разброс значений σ . На рис. 6б представлена гистограмма этих значений

и аппроксимирующая кривая плотности распределения по логнормальному закону $f(\sigma) = (\sigma a \sqrt{2\pi})^{-1} \exp\{-[\ln(\sigma/m)]^2 / 2a^2\}$ с параметрами масштаба $m = 2,8614$ (медиана) и формы $a = 0,4494$.

При отсутствии функциональной связи полевых измерений σ с общим относительным объемом рассола и воздушных включений посмотрим, как облако точек соотносится с теоретическими кривыми $\sigma = f(v_i)$. Линии 1 и 2 (см. рис. 6а) представляют пределы прочности зернистой и волокнистой структур соленого льда по методике [11, 12], построенные по температуре, солёности и плотности образцов, испытанных в северной части Обской губы для условий горизонтального сжатия (без пересчета кубической формы образцов в цилиндрическую). По этим же данным построены кривые 3 и 4 с использованием уравнений работы [13]:

$$\sigma = 37(\dot{\epsilon})^{0,22} \left[1 - (v_i / 0,270)^{0,5} \right] \quad (5)$$

для вертикально-ориентированной структуры льда при его сжатии вдоль поверхности ледяного покрова и

$$\sigma = 49(\dot{\epsilon})^{0,22} \left[1 - (v_i / 0,280)^{0,5} \right] \quad (6)$$

для аналогичного нагружения льда зернистой структуры (при скорости деформации $\dot{\epsilon} = 10^{-4} \text{ с}^{-1}$).

Если можно говорить о наилучшем совпадении функциональных зависимостей с облаком случайных точек, наилучшее соответствие теоретических и полевых данных демонстрирует кривая 3, рассчитанная по формуле (5), пересекающая медианное значение облака точек $\sigma_{0,5} = 2,86 \text{ МПа}$ в точке $v_i \approx 0,046$.

Уточним, что все рассмотренные выше значения, как для пресного, так и для соленого льда, относятся к малым образцам, т. е. не являются оценками прочности всей толщи ледяного покрова, которые могут быть рассчитаны по вертикальному распределению температуры, солёности и плотности льда и связанным с ними прочностью отдельных слоев.

В рамках данного исследования мы не стали рассматривать одну из важнейших физико-механических характеристик льда — предел прочности льда на изгиб. Это было связано с недостаточностью сведений об условиях проведения наблюдений для собранных нами данных. Однако, при получении данных сведений, мы надеемся (в ближайшее время) провести соответствующие обобщения и анализ по указанной характеристике.

Также следует уточнить, что оценки прочностных свойств льда, полученные нами в ходе обработки и анализа данных натурных наблюдений, напрямую никак не соотносятся с оценками, получаемыми для модельного льда в ледовых бассейнах (т. е. там, где добавление солей в лед производится с целью уменьшения прочности). Таким образом, результаты исследований характеристик модельного льда из известных работ для ледовых бассейнов (таких, как [14] и др.), на наш взгляд, мало применимы для проведения совместного анализа с натурными данными по прочностным характеристикам льда, полученными в Обской губе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках представленных работ были рассмотрены данные о физико-механических характеристиках припайного льда Обской губы, полученные при экспедиционных полевых исследованиях за последние 30 лет, общий объем которых превышает 200 кернов. Полученные результаты свидетельствуют о выраженной неоднозначности некоторых

характеристик льда, возникающей вследствие того, что в течение ледового сезона в губе одновременно присутствуют пресные льды, льды распресненных водоемов, морские льды.

В дальнейшем нами планируется продолжение комплекса наблюдений за физико-механическими характеристиками льда Обской губы, с возможным включением современных физических методов контроля идентичности образцов для повышения достоверности оценки прочностных характеристик льда.

Однако уже сейчас, основывая свое мнение на приведенных результатах сравнения измеренных и рассчитанных значений прочностных характеристик льда, считаем, что очевидной необходимостью является проведение дальнейшего анализа физико-механических (преимущественно — прочностных) характеристик льда, выполняемого с точки зрения возможности и допустимости снижения нормативной прочности льда для определения ледовых нагрузок на гидротехнические сооружения.

Конфликт интересов. У авторов исследования нет конфликта интересов.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kovalev S.M., Korostev V.G., Nikitin V.A., Smirnov V.N., Shushlebin A.I. Application of a borehole jack for determining the local strength of fresh and sea ice // Proceedings of the 17th International Symposium on Ice. S.-Petersburg, IAHR. 2004. V. 2. P. 147–153.
2. Налимов Ю.В., Усанкина Г.Е., Голованова С.В., Кубышкин Н.В., Нестеров А.В. Ледовый режим и особенности формирования заприпайной полыни в северной части Обской губы // Тр. ААНИИ. 2009. Т. 450. С. 153–165.
3. Zubakin G.K., Gudoshnikov Yu.P., Nesterov A.V., Kubyshkin N.V., Skutin A.A., Buzin I.V., Vinogradov R.A., Naumov A.K., Nalimov Yu.V., Klyachkin S.V., Fedyakov V.Ye., Andreev O.M. Evaluation of ice conditions of the Northern Ob Bay associated with construction of the port of Sabetta // Proceedings of the International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC. 2013. V. 1. P. 584–593.
4. Войнов Г.Н., Налимов Ю.В., Пискун А.А., Становой В.В., Усанкина Г.Е. Основные черты гидрологического режима Обской и Тазовской губ (лед, уровни, структура вод) / Под ред. д-ра геогр. наук Г.Н. Войнова. СПб.: Нестор-История, 2017. 192 с.
5. Frankenstein G.E., Garner R. Equations for determining the brine volume of sea ice from -0.5 to -22.9 °C // J. Glaciol. 1967. № 6 (48). P. 943–944.
6. Cox G., Weeks W. Equations for determining the gas and brine volumes in sea ice samples // J. Glaciol. 1983. V. 29. № 102. P. 306–316.
7. Назинцев Ю.Л., Дмитраж Ж.А., Моисеев В.И. Теплофизические свойства морского льда. Л.: Изд-во ЛГУ, 1988. 260 с.
8. Логвина Е.А., Гладыш В.А., Кубышкин Н.В., Нестеров А.В., Виноградов Р.А. Оценка заносимости подходного и морского каналов к порту в поселке Сабетта полуострова Ямал // Проблемы Арктики и Антарктики. 2012. № 4 (94). С. 105–118.
9. Гладыш В.А., Логвина Е.А., Нестеров А.В., Кубышкин Н.В. Оценка интенсивности литодинамических процессов в морском судоходном канале порта Сабетта // Инженерные изыскания. 2017. № 4. С. 36–77.
10. Лавров В.В. Деформация и прочность льда. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 210 с.
11. Гладков М.Г., Петров И.Г., Федоров Б.А. Схема расчета предела прочности льда // Тр. ААНИИ. 1983. Т. 379. С. 75–88.
12. Методическое письмо по расчету пределов прочности льда / Под ред. В.В. Богородского. Л., 1983. 50 с.

13. Timco G.W., Frederking R. M.W. Compressive strength of sea ice sheets // Cold Regions Science and Technology. 1990. V. 17 (3). P. 227–240.
14. Von Bock und Polach R.U.F., Franz R.U., Ettemab R., Gralhera S., Kellner L., Stendera M. The non-linear behavior of aqueous model ice in downward flexure // Cold Regions Science and Technology. 2019. V. 165. Paper 102775. doi.org/10.1016/j.coldregions.2019.05.001.

REFERENCES

1. Kovalev S.M., Korostelev V.G., Nikitin V.A., Smirnov V.N., Shushlebin A.I. Application of a borehole jack for determining the local strength of fresh and sea ice. Proceedings of the 17th International Symposium on Ice. S.-Petersburg, IAHR. 2004, 2: 147–153.
2. Nalimov Yu.V., Usankina G.E., Golovanova S.V., Kubyshkin N.V., Nesterov A.V. Ice regime and features of the formation of a fast ice polynya in the northern part of the Gulf of Ob. *Trudy AANII*. Proc. of AARI. 2009, 450: 153–165. [In Russian].
3. Zubakin G.K., Gudoshnikov Yu.P., Nesterov A.V., Kubyshkin N.V., Skutin A.A., Buzin I.V., Vinogradov R.A., Naumov A.K., Nalimov Yu.V., Klyachkin S.V., Fedyakov V.Ye., Andreev O.M. Evaluation of ice conditions of the Northern Ob Bay associated with construction of the port of Sabetta. Proceedings of the International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC. 2013, 1: 584–593.
4. Voinov G.N., Nalimov Yu.V., Piskun A.A., Stanovoy V.V., Usankina G.E. *Osnovnye cherty gidrologicheskogo rezhima Obskoi i Tazovskoi gub (led, urovni, struktura vod)*. Main characteristics of the hydrological regime of the Ob' Bay and Taz Bay (ice, levels, water structure). St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2017: 192 p. [In Russian].
5. Frankenstein G.E., Garner R. Equations for determining the brine volume of sea ice from –0.5 to –22.9 °C. *J. Glaciol.* 1967, 6 (48): 943–944.
6. Cox G., Weeks W. Equations for determining the gas and brine volumes in sea ice samples. *J. Glaciol.* 1983, 29 (102): 306–316.
7. Nazintsev Yu.L., Dmitrazh Zh.A., Moiseev V.I. *Teplofizicheskiye svoystva morskogo l'da*. Thermophysical properties of sea ice. Leningrad: Izd. Leningradskogo gosudarstvennogo universiteta. Ed. Leningrad State University, 1988: 260 p. [In Russian].
8. Logvina E.A., Gladyshev V.A., Kubyshkin N.V., Nesterov A.V., Vinogradov R.A. Estimation of the drift of the approach and sea channels to the port in the village of Sabetta on the Yamal Peninsula. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic research. 2012, 4 (94): 105–118. [In Russian].
9. Gladyshev V.A., Logvina E.A., Nesterov A.V., Kubyshkin N.V. Evaluation of the intensity of lithodynamic processes in the sea navigation channel of the port of Sabetta. *Inzhenernyye izyskaniya*. Engineering survey. 2017, 4: 36–77. [In Russian].
10. Lavrov V.V. *Deformatsiya i prochnost' l'da*. Deformation and strength of ice. Leningrad: Gidrometeoizdat. Hydrometeorological Publishing House, 1969: 210 p. [In Russian].
11. Gladkov M.G., Petrov I.G., Fedorov B.A. Scheme for calculating the tensile strength of ice. *Trudy AANII*. Proc. of AARI. 1983, 379: 75–88. [In Russian].
12. *Metodicheskoye pis'mo po raschetu predelov prochnosti l'da*. Pod red. V.V. Bogorodskogo. Methodical letter on the calculation of the strength of ice. Ed. V.V. Bogorodsky. Leningrad, 1983: 50 p. [In Russian].
13. Timco G.W., Frederking R.M.W. Compressive strength of sea ice sheets. Cold Regions Science and Technology. 1990, 17 (3): 227–240.
14. Von Bock und Polach R.U.F., Franz R.U., Ettemab R., Gralhera S., Kellner L., Stendera M. The non-linear behavior of aqueous model ice in downward flexure. Cold Regions Science and Technology. 2019, 165: 102775. doi.org/10.1016/j.coldregions.2019.05.001.

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-1-58-71>
УДК 551.467:656.61.052



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

Особенности совместного влияния интенсификации судоходства и изменения климата на распространение припая в Обской губе

Р.А. Виноградов^{1}, О.М. Андреев¹, О.А. Морозова¹,
Д.В. Драбенко¹, В.А. Драбенко²*

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

² — АОУ ВПО Государственный институт экономики, финансов, права и технологий, г. Гатчина, Россия

*vinra@aari.ru

Резюме

В последние годы круглогодичное судоходство в Обской губе активно осуществляется в три пункта: нефтеналивной терминал «Ворота Арктики», портовые терминалы Сабетта и «Утренний». Регулярная зимняя навигация началась в 2013–2015 гг. Количество судов за ноябрь–май уже составляет около 380 за сезон. Зимнее плавание в припаях осуществляется по ледовым каналам, что должно отражаться на стабильности припая. Целью исследования являлось определение влияния судоходства на распространение припая в Обской губе на фоне климатических изменений. В работе использовались данные по температуре воздуха, ледовым условиям и количестве судов в зимний период. Параметром суровости зимних условий являлась сумма градусо-дней мороза (СГДМ). Среднесезонное положение южной границы запрпайной полыньи служило параметром стабильности припая. Такой подход снижал влияние кратковременных колебаний температурных и ледовых условий. Анализ данных за последние 25 лет подтвердил значимое влияние судоходства на распространение припая. Из-за зимней навигации дополнительное смещение границы запрпайной полыньи на юг (для зимних условий от средних до очень легких) составило 25–50 миль. Более тяжелые зимние условия не фиксировались, и оценки для них не были получены. Выявленные изменения являются значимыми для региона. Переход от припая к дрейфующим льдам приведет к перестройке других природных процессов, что необходимо учитывать при освоении региона, поскольку изменится воздействие на инженерные объекты.

Ключевые слова: гидрометеорологические условия, гидротехнические сооружения, ледовое плавание, потепление, разрушение припая.

Для цитирования: Виноградов Р.А., Андреев О.М., Морозова О.А., Драбенко Д.В., Драбенко В.А. Особенности совместного влияния интенсификации судоходства и изменения климата на распространение припая в Обской губе // Проблемы Арктики и Антарктики. 2023. Т. 69. № 1. С. 58–71. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-1-58-71>.

Поступила 14.02.2023

После переработки 10.03.2023

Принята 13.03.2023

Peculiarities of joint influence of navigation intensification and climate change on fast ice distribution in the Ob' Bay

Roman A. Vinogradov^{1}, Oleg M. Andreev¹, Olga A. Morozova¹,
Dmitriy V. Drabenko¹, Vadim A. Drabenko²*

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

² — *IEI of HPE State Institute of Economics, Finance, Law and Technology, Gatchina, Russia*

**vinra@aari.ru*

Summary

All year-round navigation in the Ob' Bay has been operating for more than ten years. In recent years it has been performed most actively at three points: the port terminals Sabetta and «Utrenniy» (on the opposite coasts in the northern part of the bay) and the oil loading terminal «Vorota Arktiki» (in the southern part of the bay, off cape Kamenny). Regular winter navigation to Sabetta began in 2013 and to cape Kamenny in 2015. In recent years, the number of vessels in November–May has already risen to about 380 per season. The winter navigation in the fast ice is performed along ice channels, which should impact on the fast ice stability. The aim of this research was to determine the influence of navigation on the fast ice distribution in the Ob' Bay in terms of climate changes. To analyze navigation impact on the fast ice distribution in the Ob' Bay, data on air temperature, ice conditions and number of vessels in the winter period were used in the work. The sum of the freezing degree days (FDD) was chosen as a parameter of winter conditions severity. The mean location of the south boundary of the flaw polynya per season was a parameter of the fast ice stability. Such an approach reduced the influence of short-term fluctuations of temperature and ice conditions. The data analysis carried out over the last 25 years has confirmed a significant influence of navigation on the fast ice distribution. It has been found that for the range from mean to mild winter conditions (an estimate using FDD), the dislocation of the flaw polynya boundary in the south direction amounted to 0.4–0.8 degrees of latitude (25–50 miles) because of winter navigation intensification. Winter conditions more severe than mean have not been recorded in the region over recent years. Therefore, such estimates were not obtained for them. The discovered changes of ice conditions are significant for the region. The transfer from fast ice to drifting ice of different types, forms and concentration will lead to the corresponding restructuring of other natural processes (water dynamics, litho-dynamic regime, etc). Subsequently the impact of hydrometeorological factors on engineering facilities can change, affecting the navigation conditions, scenarios of loading on the hydraulic structures, absolute loading values, etc. This is a factor to consider in the economic development of the region.

Keywords: fast ice break up, hydrometeorological conditions, hydrotechnical structures, ice navigation, warming.

For Citation: *Vinogradov R.A., Andreev O.M., Morozova O.A., Drabenko D.V., Drabenko V.A.* Peculiarities of joint influence of navigation intensification and climate change on fast ice distribution in the Ob' Bay. *Problemy Arktiki i Antarkтики*. Arctic and Antarctic Research. 2023, 69 (1): 58–71. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-1-58-71>.

Received 14.02.2023

Revised 10.03.2023

Accepted 13.03.2023

ВВЕДЕНИЕ

Влияние климатических изменений на ледовые условия в Арктике является сегодня актуальной темой, что нашло отражение в работах отечественных [1–4] и иностранных специалистов [5–7], посвященных эволюции ледяного покрова отдельных морей и полярных регионов в целом. Авторами настоящей статьи влияние глобального потепления рассматривалось в нескольких исследованиях по Обь-Енисейскому региону применительно к прочностным характеристикам льда,

а также к распространению припая, но уже в связке с антропогенным воздействием (судоходством) [8–10 и др.]. В выводах к докладу на конференции «Моря России: фундаментальные и прикладные исследования» [10] было высказано предположение о существенном влиянии интенсивности ледового плавания в условиях припая на устойчивость неподвижного ледяного покрова и положение границы раздела с дрейфующими льдами. Однако относительно недавнее (на тот момент) начало хозяйственного освоения региона и связанного с ним круглогодичного судоходства ограничивало ряд наблюдений несколькими значениями, что не допускало скрупулезной проверки сделанного предположения. Продолжение наблюдений при дальнейшей интенсификация зимней навигации позволило получить новые данные для анализа влияния судового трафика.

Таким образом, выявление вклада антропогенной деятельности (судоходства) на распространение припая в Обской губе на фоне климатических изменений и являлось целью настоящей работы.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Сведения об интенсивности судоходства были получены на основе материалов интернет-ресурса «Информационная система государственного портового контроля» [11]. Система фиксирует по каждому порту время входа и выхода судна с указанием его названия и номера, что позволяет оценить судовый трафик. Однако организационная структура морского порта Сабетта вносит свою специфику в учет судового потока. Более подробно данный вопрос рассмотрен в следующей части статьи. Ледовая обстановка в акватории Обской губы анализировалась по архивным материалам ФГБУ «ААНИИ» на основе космических снимков и региональных ледовых карт за 1997–2022 гг. Частота регистрации ледовых условий составляла две карты в неделю. Особенности подготовки и анализа рядов данных о характеристиках припая приводятся далее в соответствующем разделе статьи. Температура воздуха в районе Обской губы оценивалась по наблюдениям прибрежных гидрометеорологических станций (Новый Порт, Сеяха, Сабетта, им. М.В. Попова) и данным метеорологического реанализа ERA-Interim. По этим данным (за 1997–2022 гг.) определялась сумма градусо-дней мороза как характеристика суровости зимних условий.

СУДОХОДСТВО В ОБСКОЙ ГУБЕ

Освоение Российской Арктики, особенно ее прибрежных земель, неразрывно связано с морским транспортом. На первых этапах с его помощью реализовывались разведка новых территорий и обеспечение строительства необходимой инфраструктуры. В последующем на водные пути ложилась основная нагрузка по снабжению хозяйственных объектов и вывозу сырья или готовой продукции.

Это в полной мере относится и к Обской губе, где в настоящее время развивается кластер с производственными мощностями по добыче, переработке и отгрузке углеводородов, охватывающий ряд месторождений на обоих берегах губы. Главным транспортным узлом данной акватории является морской порт Сабетта. Согласно распоряжению Правительства РФ № 242-р от 26.02.2013 [12], в состав указанного порта входит несколько терминалов:

1) универсальный терминал на Ямальском берегу у поселка Сабетта с заводом СПГ и портовыми сооружениями (71° 17' с. ш.);

2) терминал СПГ и СГК «Утренний» на Гыданском берегу у Салмановского (Утреннего) нефтегазоконденсатного месторождения (СНГКМ) с заводом СПГ и причалами отгрузки на защищенной акватории (71° 00' с. ш.);

3) арктический терминал круглогодичной отгрузки нефти (АТКОН) «Ворота Арктики» на Ямальском берегу у м. Каменный (68° 30' с. ш.).

Регулярная зимняя навигация в северной части Обской губы (от Морского канала на бере губы (расположен между 72° 10' с. ш. и 72° 33' с. ш.) до пос. Сабетта) начата с 2013 г., а далее на юг (до м. Каменный) — с 2015 г. Согласно сведениям «Табло порта Сабетта» ресурса «Информационная система государственного портового контроля» [11] с 2013 г. по настоящее время зимний трафик здесь вырос с единичных заходов до нескольких сотен судов в сезон (рис. 1). Последние четыре зимних навигации (с 2018/19 по 2021/22) количество обслуживаемых судов за 7 месяцев наличия устойчивого ледяного покрова (ноябрь–май) держится на уровне 380 единиц.

Отметим, что указанный ресурс фиксирует по всем судам не их фактические перемещения, а каждый формальный заход в порт и выход из него. Дополнительной особенностью морского порта Сабетта является общий учет судового потока без разделения на отдельные терминалы порта. Таким образом, нельзя однозначно приравнивать количество зафиксированных за выделяемый период судозаходов в порт с судопроходами по выделенному участку трассы, хотя общая интенсивность судоходства отражается объективно. Разумеется, данное замечание относится (в первую очередь) к судам обеспечения, а не судам, осуществляющим основные грузоперевозки (танкеры нефти и газа, сухогрузы и т. д.). Отметим также, что максимальный судопоток на каждом участке порта Сабетта не обязательно связан с отгрузкой добываемых углеводородов. В период строительства и реконструкции объектов доставка генеральных грузов, стройматериалов и т. д. тоже требует значительного количества судов. С учетом перечисленных особенностей, сведения о судовом трафике в данной статье следует воспринимать как обобщенный показатель интенсификации судоходства.

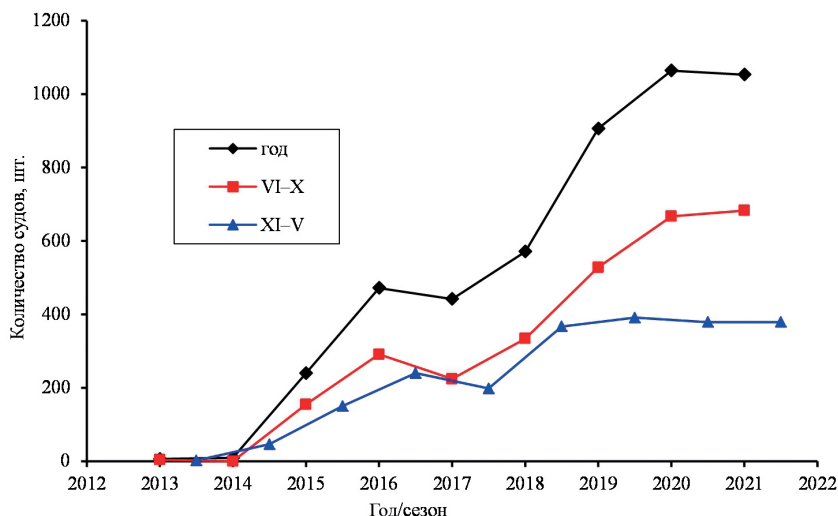


Рис. 1. Суммарный судовый трафик порта Сабетта по годам и сезонам

Fig. 1. Total vessel traffic of the port of Sabetta by years and seasons

Карты плотности судового трафика (Density Maps) с сайта MarineTraffic [13] позволяют рассмотреть основные трассы следования судов. На них указывается количество судов, зафиксированных автоматической идентификационной системой (АИС) на единицу площади за год. Заметим, что высокие плотности движения судов на таких картах, в соответствии с цветовой шкалой, обозначаются в красно-желтой гамме. Пример карт для Обской губы за 2020 и 2021 гг. приведен на рис. 2. К сожалению, общедоступные версии сервисов MarineTraffic не позволяют провести сепарацию этих данных по временным промежуткам (месяцам/сезонам), типам судов, поэтому на картах представлены только суммарные данные за каждый год. Однако основные трассы прослеживаются достаточно четко (по плотности судопотока). Способствуют этому следующие факторы, ограничивающие движение на акватории. Во-первых, это (независимо от сезона) осадка судов (особенно больших), батиметрия акватории и система организации движения на ней (наличие определенных фарватеров).

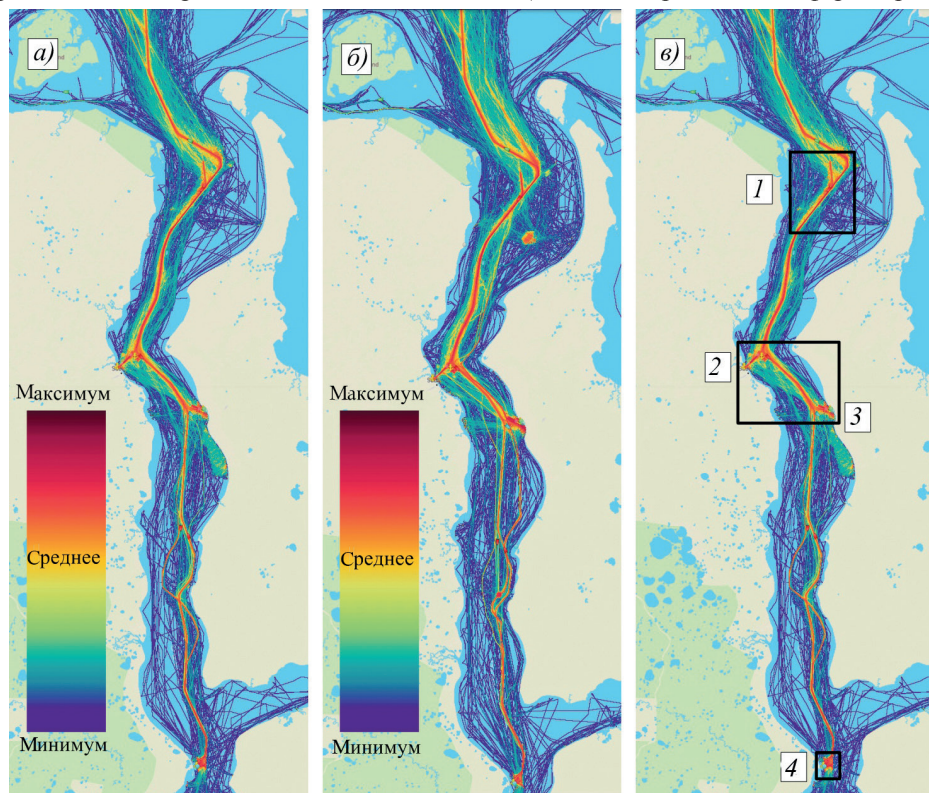


Рис. 2. Карты плотности судового трафика в Обской губе за 2020 (а), 2021 (б) гг. и выделенные районы судоходства (в).

Прямоугольниками на схеме (в) выделены ключевые районы движения судов; цифрами обозначены: 1 — Морской канал; 2, 3 и 4 — терминалы в Сабетте, на ШГКМ и у м. Каменный соответственно

Fig. 2. Maps of the vessel traffic density in the Ob' Bay for 2020 (a), 2021 (b) and selected navigation areas (v)

The rectangles on the diagram (v) highlight the key areas of ship traffic; the numbers denote: 1 — the Sea Channel; 2, 3 and 4 — terminals in Sabetta, at the the Salmanovskoye oil and gas condensate field and off Cape Kamenny, respectively

Во-вторых, для зимней навигации в условиях припая вводятся дополнительные ограничения на движение почти всех судов (в виде проложенных ледовых каналов). С учетом длительности ледового сезона и значительной доли больших грузовых судов в общем трафике — основная часть судопотока будет тяготеть к одним и тем же маршрутам, что и видно на рис. 2.

Анализируя представленные трассы плавания, необходимо выделить ряд ключевых районов. Первый — это зона Морского канала, расположенного на баре Обской губы. Раздвоение судопотоков в его северной части, заметное на рисунке, обусловлено изменением трассировки канала при его модернизации в 2020–2022 гг. Этот район характеризуется максимальным трафиком, т. к. через него проходят все суда из/в Карское море, а также стесненными условиями плавания (невозможностью прокладки дополнительного ледового канала за пределами прорези Морского канала (длина около 50 км, ширина — 0,5 км)).

Вторым ключевым районом является объединенная зона приема судов в Сабетте и на Салмановском (Утреннем) НГКМ. Здесь следует выделить сразу несколько особенностей. Во-первых, для подхода к обоим пунктам необходимы ответвления от основной (транзитной) трассы и наличие в прибрежной зоне подходных каналов протяженностью около 5 км. Во-вторых, оба они незначительно (в масштабах Обской губы) разнесены вдоль судового хода, но находятся на разных берегах. Как результат — припай на этом участке прорезается не только вдоль губы, но и поперек нее (что дополнительно уменьшает здесь стабильность ледостава). В-третьих, в местах ответвлений от основного судового хода созданы условия для еще большего ослабления припая. Например, несколько южнее поворота с транзитной трассы в сторону подходного канала Сабетты расположена рейдовая стоянка. Таким образом, в указанном месте и на достаточно большой площади (порядка 5–10 км в поперечнике) во время зимней навигации постоянно происходит техногенный взлом льда. Отворот на СНГКМ расположен под острым углом к основному судовому ходу, что также способствует ослаблению припая на несколько километров вдоль трассы. В-четвертых, судопоток на рассматриваемом участке близок к максимальному, т. к. только часть судов идет непосредственно в Сабетту (так же проходя по северо-западной границе района), а остальные направляются на СНГКМ или следуют транзитом в сторону терминала «Ворота Арктики».

Третий ключевой район прилегает к терминалу круглогодичной беспричальной отгрузки нефти (АТКОН) «Ворота Арктики» у м. Каменный (южная часть Обской губы). Здесь наблюдается минимальный судовый трафик и, несмотря на необходимость подхода к терминалу с разных сторон, незначительное потенциальное ослабление припайного льда.

Кратко рассмотрим ситуацию на транзитных участках между указанными районами. Южный участок (от терминала «Ворота Арктики» до СНГКМ) по трафику и степени техногенного воздействия на ледяной покров можно охарактеризовать аналогично району самого АТКОН. Северный участок (от Сабетты до Морского канала), напротив, имеет максимальный судопоток и высокий потенциал разрушения припая под влиянием природных и антропогенных факторов. Наглядный пример такого комплексного сценария взлома сплошного льда приведен на серии последовательных снимков ИСЗ высокого разрешения акватории Обской губы в районе Сабетты и СНГКМ за 15–20 июня 2018 г. (рис. 3).

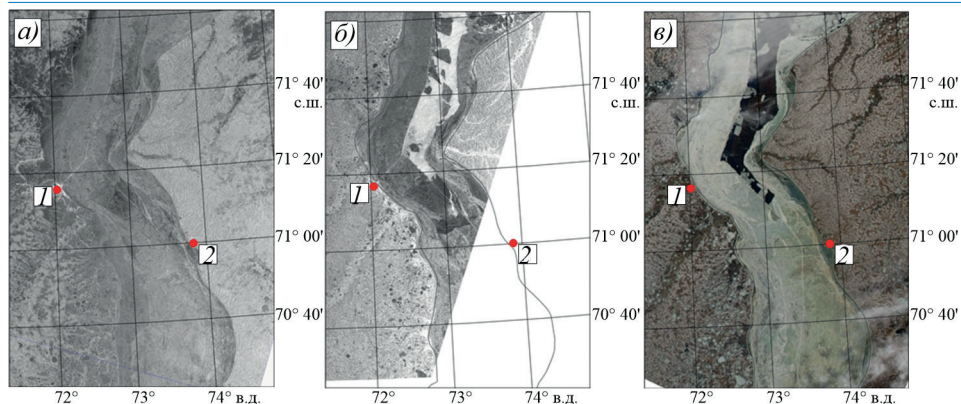


Рис. 3. Серия космических снимков северной части акватории Обской губы за 15 (а), 20 (б) и 21 (в) июня 2018 г.

1 и 2 — терминалы в Сабетте и на СНГКМ соответственно

Fig. 3. Series of satellite images of the northern part of the Ob' Bay water area for June 15 (a), 20 (b) and 21 (c), 2018.

1 and 2 — terminals in Sabetta and at the Salmanovskoye oil and gas condensate field, respectively

На фотографиях запечатлен процесс вскрытия припая по ледовым каналам (они идентифицируются как тонкие белые линии по центру губы с ответвлениями к берегам, с расположением, аналогичным представленным выше судоходным трассам). Видно, что после разрушения ледяного покрова граница заприпайной полыньи проходит именно по этим линиям.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПРИПАЯ В ОБСКОЙ ГУБЕ

Граница распространения припая в Обской губе может изменяться в широких пределах в течение короткого отрезка времени. При сильном динамическом воздействии (из-за ветра, колебаний уровня и др.), особенно на фоне оттепели, возможен взлом припая на значительной площади и быстрое отступление его кромки на юг. Резкое похолодание в спокойных условиях (без существенного влияния динамических факторов) способствует ускоренному становлению неподвижного ледяного покрова на акватории и смещению его границы далеко на север губы. Такие колебания затрудняют выделение одного положения кромки припая, характеризующего его распространение за весь сезон. Дополнительные сложности возникают из-за множества вариаций расположения и формы линии разграничения дрейфующего и припайного льда по ширине акватории. Она может проходить через губу перпендикулярно оси или наискосок, быть как прямой, так и вогнуто-выпуклой.

В качестве количественной характеристики суровости зимних условий принято использовать параметр СГДМ (сумма градусо-дней мороза). Для наглядности сопоставления суровости зимних условий с масштабами распространения припая в каждом рассматриваемом сезоне необходим подобный единый показатель для неподвижного ледяного покрова. Дополнительно следует учитывать, что распространение припая в Обской губе рассматривается в данной работе не само по себе, а в связке с вопросами судоходства. На наш взгляд, при таком подходе наиболее объективным показателем тяжести ледовых условий является среднесезонное положение южной границы заприпайной полыньи. Причем, с учетом особенностей ледового режима

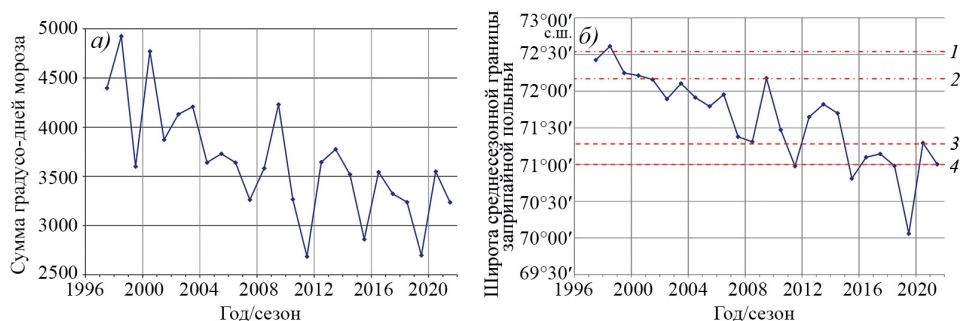


Рис. 4. Межгодовые колебания СГДМ (а) и среднесезонной границы заприпайной полыньи (б) в Обской губе для ледовых сезонов (XI–V) 1997–2022 гг.

1 и 2 — широта северной и южной границы Морского канала соответственно; 3 и 4 — широта положения терминалов в Сабетте и на СНГКМ соответственно

Fig. 4. Interannual fluctuations of the sum of the freezing degree days (a) and the average seasonal – boundary of the flaw polynya (b) in the Ob' Bay for ice seasons (XI–V) 1997–2022

1 and 2 — latitude of the northern and southern borders of the Sea Channel, respectively; 3 and 4 — the latitude of the terminals in Sabetta and on the Salmanovskoye oil and gas condensate field, respectively

Обской губы, для указанного осреднения отбираются данные только с ноября по май (включительно), когда наблюдается преимущественно устойчивый ледостав. Этим минимизируется влияние осенних и весенних ледовых процессов с их быстрыми сменами форм льда (дрейфующий или неподвижный) и значительными смещениями вдоль губы линии их разграничения.

На рис. 4 представлены графики межгодовых колебаний СГДМ и среднесезонной границы заприпайной полыньи в северной части Обской губы за ледовые сезоны (XI–V) 1997–2022 гг. Также отмечено (см. рис. 4б) широтное положение трех ключевых объектов: Морского канала, Сабетты и СНГКМ.

Максимальная чувствительность к ледовым условиям при зимней навигации будет наблюдаться на участках трассы плавания с ограничениями для маневрирования судов. В Обской губе к таким критическим районам относятся Морской канал и подходы к трем точкам погрузки-выгрузки. По графику на рис. 4б видно, что положение среднесезонной границы заприпайной полыньи фиксировалось только севернее 70° с. ш. До широты терминала «Ворота Арктики» у м. Каменный (68° 30' с. ш.) она не опускалась, т. к. здесь наблюдался устойчивый ледостав. Следовательно, наибольшее внимание необходимо уделить условиям ледового плавания на севере губы от района Сабетта–СНГКМ до выхода из Морского канала в Карское море. В данном случае, в дополнение к уже использованному параметру среднесезонной границы заприпайной полыньи, можно рассмотреть диапазон преобладающего за сезон широтного положения кромки припая. Этот критерий является, по сути, модальной характеристикой распространения неподвижного льда. На его основе ледовые условия на рассматриваемой акватории были разделены на типы, представленные в табл. 1.

Наглядное представление о характерном распространении припая при каждом из выделенных типов ледовых условий дают карты ледовой обстановки из архива ААНИИ, представленные на рис. 5. Чередование типов за 1997–2022 гг. приведено в табл. 2.

Таблица 1

Типы ледовых условий в Обской губе по преобладающему положению кромки припая

Table 1

Types of ice conditions in the Ob' Bay according to prevailing location of the fast ice edge

Сокращенное наименование типа	Полное наименование типа	Характеристика района преобладающего распространения кромки припая в Обской губе
ОТ	Очень тяжелые	На север от Морского канала вплоть до 73° 30' с. ш. (о. Белый)
Т	Тяжелые	В районе Морского канала с периодическим (эпизодическим) распространением за его северную границу
С	Средние	В границах Морского канала
Л	Легкие	Между Сабеттой и Морским каналом с редким пересечением его южной границы
ОЛ	Очень легкие	В районе между ШГКМ и Сабеттой с редким пересечением широты рейдовой стоянки у Сабетты в северном направлении (иногда до появления в границах Морского канала)

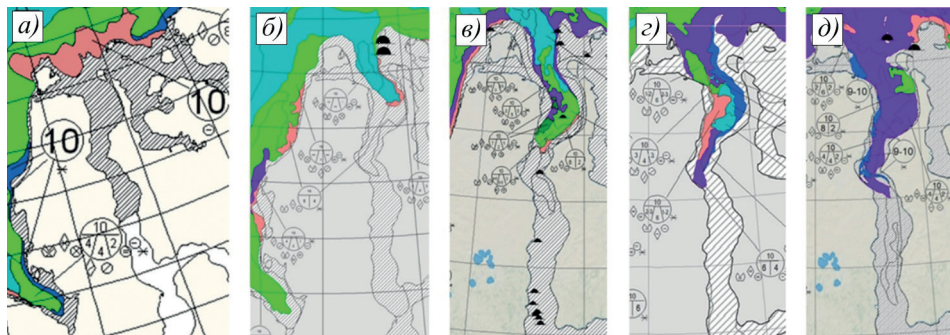


Рис. 5. Примеры характерных границ припая по выделенным типам ледовых условий:

06.03.2002 — ОТ (а), 17.04.2018 — Т (б), 30.03.2021 — С (в), 14.04.2019 — Л (г), 13.03.2020 — ОЛ (д)

Fig. 5. Examples of typical fast ice boundaries by selected types of ice conditions:

06.03.2002 — ОТ (a), 17.04.2018 — Т (b), 30.03.2021 — С (c), 14.04.2019 — Л (d), 13.03.2020 — ОЛ (e)

Таблица 2

Межгодовая изменчивость типа ледовых условий в Обской губе за 1997–2022 гг.

Table 2

Interannual variability of the type of ice conditions in the Ob' Bay for 1997–2022

Ледовые условия	1997/98	1998/99	1999/00	2000/01	2001/02	2002/03	2003/04	2004/05	2005/06	2006/07	2007/08	2008/09	2009/10	2010/11	2011/12	2012/13	2013/14	2014/15	2015/16	2016/17	2017/18	2018/19	2019/20	2020/21	2021/22
ОТ	×	×	—	×	×	—	×	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
Т	—	—	×	—	—	—	—	—	—	—	—	—	×	—	—	×	×	—	—	—	—	—	—	—	
С	—	—	—	—	—	×	—	—	×	×	—	—	—	—	—	—	—	—	—	×	—	—	—	—	
Л	—	—	—	—	—	—	—	×	×	×	×	×	—	×	×	—	—	×	×	—	—	×	×	×	
ОЛ	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	×	×	×	×	×	×	×	

Примечание. Ледовые условия даны по табл. 1. Крестом отмечен наблюдаемый тип ледовых условий для каждого зимнего сезона. Полуужирным шрифтом выделены сезоны с регулярной зимней навигацией в акватории Обской губы (2013–2022 гг.).

Note. Ice conditions are given according to Table 1. The observed type of the ice conditions for each winter season is marked by a cross. The seasons with regular winter navigation in the Ob' Bay water area (2013–2022) are marked by semi-bold type.

Предложенная типизация не заменяет и не повторяет рассмотренный выше показатель тяжести ледовых условий, основанный на среднесезонном широтном положении южной границы заприпайной полыньи. Это видно при сравнении межгодовой изменчивости двух указанных показателей (см. рис. 4 и табл. 2). Несмотря на идентичность общей направленности временного хода, наблюдаются и частные отличия для некоторых зимних сезонов. Оба варианта формализации сезонного распределения припая органично дополняют друг друга, учитывая как межгодовую изменчивость, так и характер сезонных флуктуаций.

АНАЛИЗ

В естественных условиях без существенной антропогенной нагрузки параметры ледяного покрова (форма, возраст, площадь распространения и др.) конкретной акватории зависят, в первую очередь, от температурного фона (т. е. суровости зимних условий). В простейшем виде фоновые метеоусловия характеризуются суммой градусо-дней мороза. При этом уровень естественного динамического воздействия на лед также взаимосвязан с СГДМ. При хозяйственной деятельности (в нашем случае — судоходстве) природный уровень динамического воздействия корректируется антропогенным вмешательством при неизменном характере фонового температурного влияния. Такая поправка может отразиться на состоянии ледяного покрова акватории. Для выявления возможного эффекта нами было проанализировано совместное распределение количественных показателей тяжести зимних (температурных) и ледовых условий (т. е. СГДМ и среднесезонной границы заприпайной полыньи). Как было указано выше, для анализа привлекались результаты наблюдений только за 7 месяцев (XI–V). Весь ряд данных был разделен на две части — до начала регулярной зимней навигации (1997–2013 гг.) и после (2014–2022 гг.). Ввиду незначительности судопотока в зимнюю навигацию 2013/14 г. (2 судна), показатели этого сезона были отнесены к естественным условиям. На рис. 6 для обоих периодов приведены зависимости положения границы заприпайной полыньи от температурных условий зимнего сезона. Для антропогенных данных указаны сезон и количество судов (в скобках). Это позволяет сориентироваться в уровне дополнительной нагрузки. На рисунке также отмечено широтное положение Морского канала, Сабетты и СНГКМ.

По положению отметок на распределениях видно, что точки, соответствующие антропогенному периоду, в подавляющем большинстве смещены ниже естественных для аналогичных температурных условий. Данные были аппроксимированы линейными трендами, и на их графиках заметно расхождение в углах наклона. При средних зимних условиях из-за регулярного судоходства смещение к югу среднесезонного положения границы заприпайной полыньи составило порядка 24 минут широты (около 45 км). С переходом к очень легким условиям смещение увеличивается в 2 раза (до 48 минут широты, или 90 км). Полученные результаты свидетельствуют только о сокращении протяженности припая из-за его дополнительного ослабления в результате функционирования ледовых каналов. Для более детального анализа

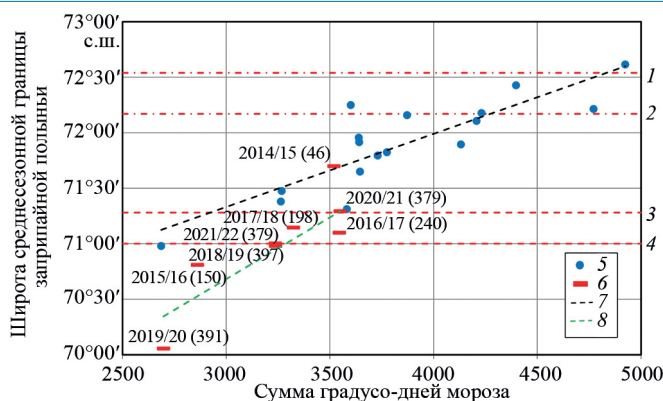


Рис. 6. Взаимосвязь среднесезонной границы заприпайной полыньи и фоновых метеоусловий (СГДМ) за 1997–2022 гг. при разном уровне антропогенного воздействия.

1 и 2 — широта северной и южной границы Морского канала соответственно; 3 и 4 — широта положения терминалов в Сабетте и на СНГКМ соответственно; 5 — отметки для периода естественных воздействий (1997–2013 гг.); 6 — отметки для периода естественных и антропогенных воздействий (2014–2022 гг.), дополнительно указаны сезоны и количество судов (в скобках); 7 — линейный тренд для периода 1997–2013 гг.; 8 — линейный тренд для периода 2014–2022 гг.

Fig. 6. The relationship between the average seasonal boundary of the flaw polynya and background weather conditions (the sum of the freezing degree days) for 1997–2022 with different levels of anthropogenic impact

1 and 2 — latitude of the northern and southern borders of the Sea Channel, respectively; 3 and 4 — the latitude of the terminals in Sabetta and on the Salmanovskoye oil and gas condensate field, respectively; 5 — marks for the period of natural influences (1997–2013); 6 — marks for the period of natural and anthropogenic impacts (2014–2022), additionally, the years and the number of vessels are indicated (in parentheses); 7 — linear trend for the period 1997–2013; 8 — linear trend for the period 2014–2022

и выводов в настоящее время еще недостаточно данных. Так, например, с начала активного судоходства в районе наблюдались достаточно легкие зимние условия. Продолжение наблюдений позволит увеличить длину рядов и, вероятно, получить данные об антропогенном влиянии на фоне средних и тяжелых зим. Дополнительно необходимо учитывать, что фоновые температурные условия и движение судов создают (в рассматриваемом случае) только предпосылки для ослабления неподвижного ледяного покрова. Непосредственно разрушение припая происходит под воздействием динамических природных факторов (ветер, колебания уровня и др.), интенсивность которых также имеет межгодовую изменчивость. Комплексный учет термических и динамических условий позволит не только расширить набор параметров для анализа антропогенного воздействия, но и более полно рассмотреть его на фоне происходящих климатических изменений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты анализа данных по трафику судов, ледовым и температурным условиям в Обской губе за последние 25 лет подтвердили значимое влияние судоходства на распространение припая. Было установлено, что для диапазона от средних до очень легких зимних условий (оценка по СГДМ) из-за интенсификации зимней навигации смещение границы заприпайной полыньи в южном направлении составило 0,4–0,8 градуса широты (45–90 км). Зимние условия тяжелее средних за последние годы в регионе не

фиксируются, и подобные оценки для них не были получены. Для расширения комплексного подхода к проблеме антропогенного воздействия на неподвижный ледяной покров с учетом фоновых климатических изменений требуется продолжение наблюдений с расширением набора параметров и последующим их анализом.

Выявленные изменения ледовых условий являются значимыми не только для северной части Обской губы, но и для всей ее акватории. Переход от припая к дрейфующим льдам разных видов, форм и сплоченности приведет к соответствующей перестройке других природных процессов (динамика вод, литодинамический режим и т. д.). Вслед за этим может меняться воздействие гидрометеорологических факторов на инженерные объекты — изменение условий плавания, сценариев и абсолютных величин нагрузок на ГТС, экстремальных отметок уровня моря в зимний период и т. д. Это необходимо учитывать при хозяйственном освоении региона.

Рассмотренная проблема актуальна не только для Обской губы, но и в целом для прибрежных акваторий Арктики, осваиваемых человеком. При интенсификации зимнего судоходства в припаях эффект от накопления антропогенного воздействия должен на определенном уровне перейти в качественные изменения ледовых условий, что опосредованно может повлиять на хозяйственную деятельность. В частности, подобный сценарий вероятен в Енисейском заливе, где давно осуществляется зимняя навигация, но ее интенсивность еще не достигла критического уровня.

Конфликт интересов. Конфликт интересов отсутствует.

Финансирование. Работа выполнена в рамках плановой научной тематики ФГБУ ГНЦ РФ «ААНИИ» по теме 5.1.6 НИТР Росгидромета на 2020–2024 гг.

Competing interests. There is no conflict of interests.

Funding. The work was prepared within the framework of the planned science topics of FSBI SSC RF “AARI” on the subject 5.1.6 of SRTW of Roshydromet for 2020–2024.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Ковалев Е.Г., Смоляницкий В.М. Научные исследования в Арктике. Т. 2. Климатические изменения ледяного покрова морей Евразийского шельфа. СПб.: Наука, 2007. 136 с.
2. Фролов И.Е., Кулаков М.Ю., Фильчук К.В. Баланс льда в Северном Ледовитом океане в 1979–2019 гг. (по данным моделирования) // Лед и снег. 2022. Т. 62. № 1. С. 113–124. doi:10.31857/S2076673422010120.
3. Борзенкова И.И., Ершова А.А., Жильцова Е.Л., Шаповалова К.О. Морской лед Арктического бассейна в свете современных и прошлых климатических изменений // Лед и снег. 2021. Т. 61. № 4. С. 533–546. doi:10.31857/S2076673421040106.
4. Лис Н.А., Егорова Е.С. Климатическая изменчивость ледовитости Баренцева моря и его отдельных районов // Проблемы Арктики и Антарктики. 2022. Т. 68. № 3. С. 234–247. doi:10.30758/0555-2648-2022-68-3-234-247.
5. Bintanja R., Van Oldenborgh G., Katsman C. The effect of increased fresh water from Antarctic ice shelves on future trends in Antarctic Sea ice // Annals of Glaciology. 2015. V. 56 (69). P. 120–126. doi: <https://doi.org/10.3189/2015AoG69A001>.
6. Constable A.J., Harper S., Dawson J., Holsman K., Mustonen T., Piepenburg D., Rost B. Polar Regions // Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 2022. P. 2319–2368. doi:10.1017/9781009325844.023.

7. Hao G., Su J, Vihma T., Huang, F. Trends, abrupt shifts and interannual variability of the Arctic Wintertime Seasonal Sea Ice from 1979 to 2019 // *Annals of Glaciology*. 2020. V. 61 (83). P. 441–453. doi: <https://doi.org/10.1017/aog.2020.68>.
8. Андреев О.М., Драбенко Д.В., Виноградов Р.А., Орлова Е.Ю. Влияние потепления климата на прочностные характеристики льда в Обской губе // *Лед и снег*. 2019. Т. 59. № 4. С. 539–545. doi:10.15356/2076-6734-2019-4-409.
9. Виноградов Р.А., Андреев О.М., Орлова Е.Ю. Распространение припая в эстуариях Оби и Енисея при глобальном потеплении // Тезисы докладов всероссийской конференции «Междисциплинарные научные исследования в целях освоения горных и арктических территорий», г. Сочи, 24–29 сентября 2018 г. Сочи, 2018. С. 51.
10. Виноградов Р.А., Андреев О.М., Орлова Е.Ю. Антропогенное воздействие на распространение припая в Обь-Енисейском регионе на фоне климатических изменений // Тезисы докладов Всероссийской научной конференции «Моря России: фундаментальные и прикладные исследования», 23–28 сентября 2019, Севастополь. Севастополь: ФГБУН ФИЦ МГИ, 2019. С. 167–169.
11. Информационная система государственного портового контроля, Модуль «Регистрация заходов и отходов судов в морских портах Российской Федерации». URL: <https://portcalltable.marinet.ru/> (дата обращения: 01.10.2022).
12. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 26 февраля 2013 г. № 242–п с изменениями от 12.09.2015, 03.10.2015 и 31.08.2019. URL: <https://www.mapm.ru/Port/Sabetta> (дата обращения: 20.10.2022).
13. MarineTraffic. URL: <https://www.marinetraffic.com> (дата обращения 15.10.2022).

REFERENCES

1. Frolov I.E., Gudkovich Z.M., Karklin V.P., Kovalev E.G., Smolianitskii V.M. *Nauchnye issledovaniia v Arktike. V. 2. Klimaticheskie izmeneniia ledianogo pokrova morei Evraziiskogo shel'fa*. Scientific research in the Arctic. V. 2. Climatic changes in the ice cover of the seas of the Eurasian shelf. St. Petersburg: Nauka, 2007: 136 p. [In Russian].
2. Frolov I.E., Kulakov M.Iu., Fil'chuk K.V. Ice balance modeling in the Arctic Ocean in 1979–2019. *Led i sneg*. Ice and Snow. 2022, 62 (1): 113–124. doi: 10.31857/S2076673422010120. [In Russian].
3. Borzenkova I.I., Ershova A.A., Zhil'tsova E.L., Shapovalova K.O. Arctic sea ice in the light of current and past climate changes. *Led i sneg*. Ice and Snow. 2021, 61 (4): 533–546. doi: 10.31857/S2076673421040106. [In Russian].
4. Lis N.A., Egorova E.S. Climatic variability of the ice extent of the Barents Sea and its individual areas. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2022, 68 (3): 234–247. doi: 10.30758/0555-2648-2022-68-3-234-247. [In Russian].
5. Bintanja R., Van Oldenborgh G., Katsman C. The effect of increased fresh water from Antarctic ice shelves on future trends in Antarctic Sea ice. *Annals of Glaciology*. 2015, 56 (69): 120–126. doi:10.3189/2015AoG69A001.
6. Constable A.J., Harper S., Dawson J., Holsman K., Mustonen T., Piepenburg D., Rost B. Polar Regions. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 2022: 2319–2368. doi:10.1017/9781009325844.023.
7. Hao G., Su J, Vihma T., Huang, F. Trends, abrupt shifts and interannual variability of the Arctic wintertime seasonal sea ice from 1979 to 2019. *Annals of Glaciology*. 2020, 61 (83): 441–453. doi:10.1017/aog.2020.68.
8. Andreev O.M., Drabenko D.V., Vinogradov R.A., Orlova E.Iu. Influence of climate warming on the strength characteristics of ice in the Ob Bay. *Led i sneg*. Ice and Snow. 2019, 59 (4): 539–545. doi: 10.15356/2076-6734-2019-4-409. [In Russian].

9. Vinogradov R.A., Andreev O.M., Orlova E.Iu. The fast ice distribution in the Ob and Yenisei Estuaries under global warming. Abstracts of the All-Russian Conference «Multidisciplinary Scientific studies for the development of mountainous and the Arctic areas». Sochi, 2018: 51 [In Russian].

10. Vinogradov R.A., Andreev O.M., Orlova E.Iu. The fast ice distribution in the Ob-Yenisei area under the anthropogenic impact against the background of climate changes. Abstracts of the All-Russian scientific conference «Seas of Russia: Fundamental and Applied Research». Sevastopol: FGBUN FITs MGI, 2019: 167–169. [In Russian].

11. *Informatsionnaia sistema gosudarstvennogo portovogo kontrolya, Modul' «Registratsiia zakhodov i otkhodov sudov v morskikh portakh Rossiiskoi Federatsii»*. Port State Control Information System, Module “Registration of ship entries and departures in the seaports of the Russian Federation”. Available at: <https://portcalltable.marinet.ru/> (accessed 01.10.2022). [In Russian].

12. *Rasporiazhenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii 26.02.2013 № 242-r s izmeneniiami ot 12.09.2015, 03.10.2015 i 31.08.2019*. Decree of the Government of the Russian Federation of 26 February 2013 № 242–r as amended on 12 September 2015, 3 October 2015 and 31 August 2019. Available at: <https://www.mapm.ru/Port/Sabetta> (accessed 20.10.2022). [In Russian].

13. MarineTraffic. Available at: <https://www.marinetraffic.com> (accessed 15.10.2022).

ГИДРОЛОГИЯ СУШИ И ГИДРОХИМИЯ
HYDROLOGY OF LAND AND HYDROCHEMISTRY

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-1-72-90>

УДК 556.16 (282.256.21+282.256.28)



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

К вопросу современной изученности водного стока малых рек, впадающих в Обскую и Тазовскую губы

Е.В. Румянцева, О.В. Муждаба, И.И. Василевич, А.А. Пискун, М.В. Третьяков*
ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,
Санкт-Петербург, Россия

*rev@aari.ru

Резюме

Актуальность исследования связана с возможностью использования водных ресурсов малых рек, впадающих в Обскую и Тазовскую губы, для обеспечения пресной водой населения и газонефтедобывающей промышленности ЯНАО. Цель работы — обобщить данные исследований стока малых рек и рассчитать площади водосборов малых рек с помощью ГИС-технологий. Объектами исследования являются более 200 малых рек водосбора Обской и Тазовской губ. Установлено, что стационарные наблюдения за стоком воды на них не проводились. Обобщены фондовые экспедиционные наблюдения АНИИ по измеренным расходам воды. Современные данные по стоку воды от водопользователей, помещенные в АИС ГМВО, являются спорными и нуждаются в критическом анализе. В едином виде представлены ранее изданные карты годового слоя стока Ямало-Гыданского региона, отмечено схожее широтное распределение изолиний стока. Надежность оценки речного стока по картам в значительной степени определяется точностью вычисления площади водосбора. ГИС-расчеты водосборных площадей рек были выполнены двумя методами. Автоматизированная оцифровка по ЦМР ASTER показала некорректный результат. Ручная оцифровка водосборов трудоемка, но получены надежные результаты для равнинного рельефа Ямало-Гыданского региона. Впервые с помощью ГИС были получены линии водоразделов и значения площадей водосборов малых рек. При идентификации конкретных рек возникают трудности, обусловленные разночтениями их наименований в разных источниках. Необходима организация государственного мониторинга на малых реках, включая обязательные измерения расходов воды, в первую очередь на реках Сабетта-Яха, Се-Яха, Мессо-Яха, обеспечивающих пресной водой хозяйственные объекты. Перспективными направлениями оценки стока являются моделирование формирования стока и использование данных спутниковых снимков.

Ключевые слова: Арктика, водный сток, ГИС, Гыданский полуостров, карта стока, малая река, площадь водосбора, полуостров Ямал, Тазовский полуостров, устьевая область.

Для цитирования: Румянцева Е.В., Муждаба О.В., Василевич И.И., Пискун А.А., Третьяков М.В. К вопросу современной изученности водного стока малых рек, впадающих в Обскую и Тазовскую губы // Проблемы Арктики и Антарктики. 2023. Т. 69. № 1. С. 72–90. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-1-72-90>.

Поступила 07.11.2022

После переработки 27.01.2023

Принята 07.02.2023

Water runoff of small rivers flowing into the Gulf of Ob' and Taz Bay: current state of research

Elena V. Rumiantseva, Olga V. Muzhdaba, Igor I. Vasilevich,
Aleksandr A. Piskun, Mikhail V. Tretiakov*

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

**rev@aari.ru*

Summary

Fresh water supply is a basic need of the gas and oil industry of the Yamal-Gydan region. Small rivers flowing into the Ob' and Taz Bay could be used for solving this problem. The purpose of the study is to summarise the available research data on the runoff of small rivers and to calculate the catchment areas using GIS technologies. The study covers more than 200 small rivers in the catchment area of the Ob' and Taz Bay. It is established that there have been no stationary observations of the water runoff on them. Expedition observations of water discharges of small rivers are summarized. More than 40 small rivers are involved in water consumption. The runoff data from water users in the State Water Registry are questionable and need to be critically analyzed. Published annual runoff maps of the Yamal-Gydan region are presented in a unified form. Consolidation of the annual runoff maps showed an overall latitudinal distribution of the runoff isolines. The reliability of river runoff estimates from maps is largely determined by the accuracy of the catchment area calculations. GIS calculation of the river catchment areas has been done using two methods. Automated digitization by DEM has given incorrect results, which need to be verified. Manual digitization of catchments is labour-intensive, but gives reliable results for the lowland relief of the Yamal-Gydan region. For the first time, small rivers' catchment areas obtained by GIS have been calculated. Difficulties arise in using the names of small rivers, which are different from one source to another. It is necessary to organize government monitoring on small rivers including obligatory measurements of water discharge, first of all on the Sabetta-Yakha, Se-Yakha and Messo-Yakha rivers, which provide fresh water to economic facilities. The modeling of runoff formation and the use of satellite image data are promising directions of runoff assessment.

Keywords: Arctic, catchment area, estuary, GIS, Gyda Peninsula, river runoff, runoff map, small river, Tazovsky Peninsula, Yamal Peninsula.

For Citation: Rumiantseva E.V., Muzhdaba O.V., Vasilevich I.I., Piskun A.A., Tretiakov M.V. Water runoff of small rivers flowing into the Ob' and Taz Bay: current state of research. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2023, 69 (1): 72–90. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-1-72-90>.

Received 07.11.2022

Revised 27.01.2023

Accepted 07.02.2023

ВВЕДЕНИЕ

При освоении углеводородных ресурсов Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО) одной из приоритетных задач является обеспечение пресной водой хозяйственной инфраструктуры, расположенной на побережье Обской и Тазовской губ и на территории их водосбора. Особенно эта проблема актуальна в северной части Обской губы — ведь, несмотря на огромные запасы пресной воды в акватории из-за сезонной миграции галокина [1, 2], доступность ее не гарантирована. Альтернативным решением могли бы служить водные ресурсы малых рек территории. Перед проектировщиками и изыскателями ставятся задачи по расчету характеристик гидрологического режима, а из всего спектра гидрологической информации одной из наиболее востребованных является информация о речном стоке. Однако реки

водосбора Обской и Тазовской губ практически не изучены, опубликованных данных экспедиционных наблюдений крайне мало.

Цель работы — обобщить имеющиеся сведения о наблюдениях за стоком воды на малых реках, впадающих в Обскую и Тазовскую губы, определить площади их водосборов с помощью ГИС-технологий. Названия рек приводятся в соответствии со справочником [3]. Отметим, что многотомный справочник изученности рек СССР положен в основу информационной системы Государственного водного реестра России (ГВР) Федерального агентства водных ресурсов (Росводресурсы), которая используется водопользователями.

МАТЕРИАЛЫ

Материалами к работе послужили издания Водного кадастра (справочники, гидрологические ежегодники), легшие в основу базы данных [4], а также актуальная информация состояния гидрологической сети Росгидромета, ежегодно поступающая в Арктический и антарктический научно-исследовательский институт (ААНИИ) из УГМС. Кроме того, использованы фондовые материалы ААНИИ по экспедициям в районе исследования. Современные сведения водопользователей из автоматизированной информационной системы «Государственный мониторинг водных объектов» (АИС ГМВО) Росводресурсов [5] были оценены для возможности их применения. Определение линий водоразделов и расчет площадей водосборов рек проводились в геоинформационной системе QGIS на основе цифровой модели рельефа (ЦМР) ASTER [6] и топографических карт масштаба 1:50000 и 1:200000 [7, 8].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Обзор исследований водного стока малых рек

Реки, впадающие в Обскую и Тазовскую губы, протекают на полуостровах Ямал, Гыданский и Тазовский (см. рисунок на вклейке). В Обскую губу впадает 149 рек длиной более 10 км, а в Тазовскую — 52, которые можно определить как притоки первого порядка в трактовке, принятой в [9], т. е. это реки, непосредственно впадающие в губы. На рисунке изображена схема расположения рек, впадающих в Обскую и Тазовскую губы, без обозначения их притоков; нанесены реки, относящиеся к притокам устьевому участку Оби. На схеме не подписаны реки, поименованные в справочнике [3] как «без названия». Для рек протяженностью более 100 км приведено значение их длины в км. Среди малых рек полуострова Ямал наиболее длинными являются Яда-Яходы-Яха, Вэнуй-Еуо, Тамбей, Сабетта-Яха, Ляккато-Сё, Сё-Яха; Гыданского полуострова — Мессо-Яха, Тота-Яха, Анти-Паюта-Яха; Тазовского полуострова — Адер-Паюта, Пойлово-Яха. Отметим, что данная схема расположения рек представляет практический интерес для пользователей, поскольку в справочнике [3] гидрографическая схема для Ямало-Гыданского региона отсутствует.

Реки района типично равнинные, сравнительно короткие и маловодные, берущие начало на слабо выраженных водоразделах тундры. Меандрируя, они медленно текут в широких заболоченных долинах. Большинство рек характеризуется сильной извилистостью. Величина уклонов обычно незначительная. Речной сток зачастую зарегулирован озерами и болотами, что при малых уклонах поверхности способствует задерживанию выпавших осадков [10–12]. Основные фазы водного режима рек — весеннее половодье, летне-осенняя и зимняя межени. Объем стока весеннего половодья составляет 70–78 % от годового. После спада половодья наступает летне-осенняя межень (20–30 % от годо-

**Действующие гидрологические посты на малых реках водосбора
Обской и Тазовской губ**

Table 1

**Active hydrological observation stations on small rivers in the catchment area
of the Ob' and Taz Bay**

Название гидрологического поста	Периоды наблюдений за основными элементами гидрологического режима				
	уровень воды		температура воды	состояние водного объекта (ледовые явления)	толщины льда и высота снега на льду
	период	дискретность			
р. Сеяха — пос. Сеяха	1967–1994	4 срока и ежечасные	2000–наст. вр.	2000–наст. вр.	2006–наст. вр.
	2000–наст. вр.	2 срока			
р. Анти-Паюта-Яха — пос. Антипаюта	1965–1988	4 срока и ежечасные	1988–наст. вр.	1988–наст. вр.	1988–наст. вр.
	1988–наст. вр.	2 срока			
р. Ныда — с. Ныда	1962–наст. вр.	2 срока	1962–наст. вр.	1962–наст. вр.	1962–наст. вр.

вого стока), на которую накладываются дождевые паводки. На зимнюю межень после октября и до начала июня приходится 2–3 % годового стока [12, 13]. Характерная гидрологическая особенность малых рек — преобладание поверхностного стока, который в отдельные годы приближается к суммарному [14]. В устьях малые реки подвержены влиянию сгонно-нагонных и приливно-отливных явлений со стороны акватории Обской и Тазовской губ, здесь могут наблюдаться так называемые обратные течения.

По состоянию на 2022 г. *стационарные наблюдения* проводятся на гидрологических постах трех малых рек: Сё-Яха (Сеяха), Анти-Паюта-Яха, Ныда (табл. 1). В стандартную программу входят двухсрочные наблюдения за уровнем и температурой воды, состоянием водного объекта (ледовыми явлениями), за толщиной льда и высотой снега на льду. Наблюдения за водным стоком отсутствуют, измерения расходов воды не проводятся. Все посты находятся в зоне влияния сгонно-нагонных и приливно-отливных явлений Обской и Тазовской губ. В условиях резкого изменения уровней воды под влиянием этих явлений двухсрочные наблюдения не отражают особенности уровня режима, вследствие чего такие данные непригодны для оценки экстремальных характеристик уровня [1]. Поэтому четырехсрочные и ежечасные наблюдения являются необходимыми наблюдениями в зоне устьевых процессов.

В 1973–1989 гг. на притоке устьевого участка Оби, реке Кутоп-Юган, работал гидрологический пост в пос. Кутопьюган. Измерения расходов воды на нем не проводились.

Для определения основных расчетных гидрологических характеристик реки при отсутствии данных о стоке возможно использование данных реки-аналога [15]. В качестве такой реки в некоторых случаях, из-за отсутствия более подходящих вариантов, используется р. Щучья, на которой расположен гидрологический пост в пос. Щучье. Река впадает в протоку Малая Обь и является притоком устьевого участка реки Оби. Ряд наблюдений за стоком воды (1955–1967, 1985–1990 гг.) составляет 19 полных лет и в соответствии с нормативным документом [15] достаточен для определения статистических характеристик стока воды р. Щучья. В 2013 г. пост возобновил работу, но, по сведениям Обь-Иртышского УГМС, качество измерений низкое, имеются длительные пропуски и достоверность данных составляет 50 %.

В отдельные годы ниже и выше поста русло реки промерзает и сток учитывается не полностью. С 2022 г. из программы наблюдений на посту исключены измерения расходов воды. Подчеркнем, что использование данного поста в качестве аналога при гидрологических расчетах для других малых рек Ямала недопустимо, поскольку сток реки формируется в горной области Полярного Урала и водный режим отличается от типично равнинных ямальных рек. В качестве рек-аналогов для определения основных гидрологических характеристик рекомендуется использовать реки западного склона полуострова Ямал, впадающие в Байдарацкую губу. Натурные данные по некоторым из них были получены экспедициями ГГИ [11, 16] для обеспечения проектирования и строительства мостовых переходов железной дороги.

Началом *экспедиционных гидрологических исследований* Ямала принято считать экспедицию Б.М. Житкова в 1908 г. [17]. С целью составления физико-географической характеристики Ямало-Гыданской области были проведены комплексные исследования ААНИИ 1970–1972 гг., в том числе гидрологические работы на р. Нурма-Яха (Нурмаяха) [12]. В 70-е и 80-е гг. XX в. работали экспедиции ААНИИ и Амдерминского УГМС (АУГМС) в Обско-Тазовской устьевой области, в ходе которых были обследованы отдельные участки рек Нурма-Яха, Сабетта-Яха, Юрибече-Яха, Тадибе-Яха, Нгарка-Тетнеда-Яха. В 1980-х гг. на территории ЯНАО работала Западно-Сибирская экспедиция ГГИ, в том числе была исследована река Пя-Сядэй-Яха, впадающая в Обскую губу [11, 18]. В 2012–2013 гг. были проведены две экспедиции ААНИИ в исследуемом районе. Экспедиция на р. Сабетта-Яха выполняла гидрологические наблюдения и работы для оценки гидрологического режима. Комплексная экспедиция ААНИИ «Ямал-Арктика» проводила гидрологические наблюдения в устьях рек Сабетта-Яха, Сё-Яха, Пя-Сядэй-Яха, Хэвы-Сё, включая измерения расходов воды и гидрохимические исследования [19, 20]. Для обеспечения проектирования и строительства инфраструктуры добывающей отрасли в ЯНАО работали экспедиции многих других организаций, но в большинстве случаев результаты наблюдений остаются неопубликованными.

Таблица 2

Сведения об измеренных расходах воды на малых реках по экспедиционным данным

Table 2

Information about measured water discharge of small rivers according to expedition data

Река	Створ	Дата / период	Кол-во ИРВ	Расход / диапазон расходов, м ³ /с	Примечание
Сабетта-Яха	2 км от устья	12.09.1979	1	26,0	Экспедиция АУГМС
	0,5 км от устья	12.09.1980	1	9,25	То же
	9,5 км от устья	10.06.2012–27.07.2012	19	13,7–76,6	Экспедиция ААНИИ на р. Сабетта-Яха
	17 км от устья	20.08.2012	1	49,9	Экспедиция ААНИИ «Ямал-Арктика»
	36 км от устья	15.06.2013–29.09.2013	118	1,80–238	Экспедиция ААНИИ на р. Сабетта-Яха
	20 км от устья	13.09.2013	1	14,8	Экспедиция ААНИИ «Ямал-Арктика»
	5 км от устья	14.09.2013	1	44,1	То же

Река	Створ	Дата / период	Кол-во ИРВ	Расход / диапазон расходов, м³/с	Примечание
Сё-Яха (Зеленая)	40,3 км от устья	30.08.1987–10.09.1987	8	32,0–74,4	Экспедиция Гипроречтранса
	18,2 км от устья	21.08.2012	1	42,4	Экспедиция ААНИИ «Ямал-Арктика»
	Сё-Яха (Зеленая)	21.08.2012	1	27,4	То же
	Юж. Сё-Яха	21.08.2012	1	11,8	“
Юрибече-Яха	0,5 км от устья	24.09.1979	1	30,9	Экспедиция АУГМС
	То же	02.09.1980	1	22,9	То же
Нурма-Яха	1 км от устья	09.09.1979	1	13,5	“
	То же	01.08.1980	1	10,8	“
	“	02.09.1981	1	7,21	“
Хэвы-Сё	Устье	24.08.2012	1	0,95	Экспедиция ААНИИ «Ямал-Арктика»
Пя-Сядэй-Яха	То же	27.08.2012	1	1,00	То же
Сетная	“	19.06.1947	1	9,15	Северная проектно-изыскательская экспедиция
Хейм-Паюта	1 км от устья	17.09.1981	2	6,41; 6,22	Экспедиция АУГМС
Тадибе-Яха	То же	28.09.1981	1	27,9	То же
Нгарка-Тетнеда-Яха	0,1 км от устья	06.09.1980	1	4,69	“

Примечание. ИРВ — измеренные расходы воды

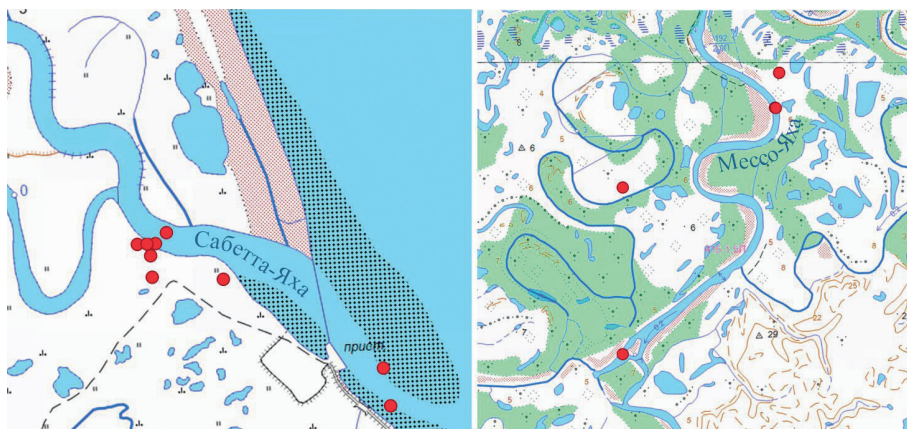


Рис. 1. Пример расположения гидрометрических створов р. Сабетта-Яха и р. Мессо-Яха по данным АИС ГМВО.

Красными точками отмечены створы измерений расходов воды

Fig. 1. An example of the Sabetta-Yakha and Messo-Yakha rivers discharge site location according to AIS SWBM.

The red dots mark the water discharge measurement sites

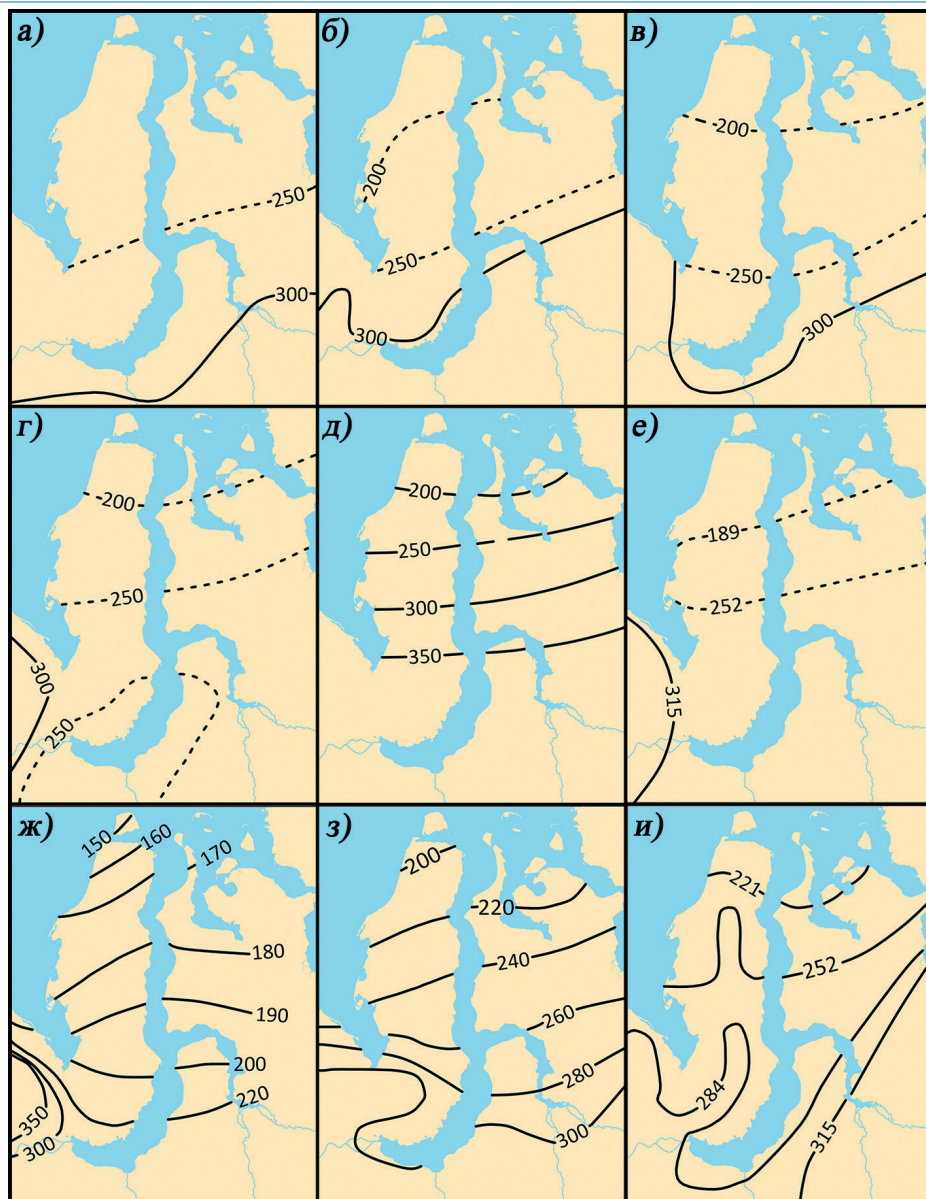


Рис. 2. Карты среднегодового слоя стока рек в мм по литературным источникам:

a) — монография «Западная Сибирь», 1963 [21]; *б)* — Куприянова Е.И., 1963 [22]; *в)* — Дрейер Н.Н., 1969 [23]; *г)* — Плиткин Г.А., 1976 [24]; *д)* — экспедиция ААНИИ, 1977 [12]; *е)* — атлас расчетных гидрологических карт, 1986 [25]; *ж)* — Гопченко и др., 1995 [26]; *з)* — атлас ЯНАО, 2004 [27]; *и)* — атлас «Российская Арктика», 2019 [28]. Пунктирными линиями показаны изолинии, не обеспеченные данными

Fig. 2. Maps of average annual river runoff layer in mm according to the literature:

a) — monograph “Western Siberia”, 1963 [21]; *б)* — Kupriianova E.I., 1963 [22]; *в)* — Dreier N.N., 1969 [23]; *г)* — Plitkin G.A., 1976 [24]; *д)* — the AARI expedition, 1977 [12]; *е)* — the atlas of calculated hydrological maps, 1986 [25]; *ж)* — Gopchenko et al., 1995 [26]; *з)* — the atlas of the YNAO, 2004 [27]; *и)* — the atlas “Russian Arctic”, 2019 [28]. Dashed lines show isolines for which no data is provided

Проведен поиск и обобщение сведений об измеренных расходах воды (ИРВ) на малых реках, которые содержатся в архивных материалах, хранящихся в ААНИИ (табл. 2).

К разряду экспедиционных наблюдений можно отнести гидрологические работы, проводимые организациями-водопользователями. Водопользователи передают получаемые морфометрические данные водных объектов, измеренные скорости водного потока и расходы воды в АИС ГМВО Росводресурсов [5], которая содержит сведения начиная с 2008 г. и ежегодно пополняется. Однако качество передаваемой информации достаточно спорно. Анализ данных по измеренным расходам воды показал сильный разброс значений на одних и тех же реках и в один и тот же временной период, но полученных разными организациями. Координаты гидрологических створов зачастую ошибочны: положенные на карту точки оказываются на суше, иногда на значительном расстоянии от указанных водных объектов. На рис. 1 приведен пример расположения гидрометрических створов на реках Сабетта-Яха и Мессо-Яха, согласно информации АИС ГМВО.

Для оценки величины стока часто используют *карты стока*, выраженного в слое (мм) или модуле стока (л/с·км²). Авторами сопоставлены карты годового стока по данному региону, опубликованные в научной литературе. На рис. 2 представлены девять карт годового слоя стока территории водосборов малых рек Обской и Тазовской губ в хронологическом порядке их публикации.

Карты годового стока построены на основе уравнивания водного баланса с использованием метеорологических данных. Отмечается, что изолинии карт северной и центральной части Ямало-Гыданского региона из более ранних источников [21–25] не обеспечены данными. Карта [12] построена с привлечением небольшого количества натурных наблюдений экспедиций ААНИИ. Для создания карты годового стока [26] вместе с нормами осадков использовалась формула теплоэнергетического эквивалента. Основой для построения карты годового стока из Атласа ЯНАО [27] послужили расчеты по приведению рядов к многолетнему периоду, были использованы данные о стоке экспедиций ААНИИ и ГГИ, а также данные с близлежащих метеостанций. Наиболее современная карта годового стока [28], к сожалению, не содержит комментариев об использованных данных для ее создания.

Представленные на рис. 2 изолинии среднегодового стока в общих чертах демонстрируют качественное сходство в их широтной протяженности. Однако на вопрос, какому источнику отдать предпочтение при выборе конкретных значений стока, в настоящее время уверенно ответить невозможно. Причина состоит в отсутствии достаточного обоснования данными натурных наблюдений для всех существующих схем изолиний. Ответ на данный вопрос можно получить лишь по мере появления необходимых данных наблюдений за стоком воды на малых реках местного водосбора. При этом при определении картируемых характеристик на основе измеренных расходов воды наряду с точностью наблюдений ключевую роль играет также точность определения площадей водосбора. А с этим вопросом, как показано далее, имеются определенные проблемы, требующие разрешения.

Методика и результаты расчета площадей водосборов малых рек

Площадь водосбора реки является важнейшей характеристикой, в значительной степени определяющей величину водного стока, и исходной величиной при определении других гидрографических характеристик, используемых в инженерных расчетах. Однако для более двухсот малых рек, впадающих в Обскую и Тазовскую губы, в справочнике [3] представлены значения площадей водосборов лишь 27 рек.

С помощью ГИС-технологий был проведен расчет площадей водосбора практически всех рек, впадающих в Обскую и Тазовскую губы. Картографические работы в ГИС проводились двумя способами: автоматизированным по ЦМР и оцифровкой «вручную».

Автоматизированный способ выделения водосборов был проведен на основе методики собственной разработки. В качестве ЦМР была выбрана модель ASTER [6] с горизонтальным разрешением 30 метров на один пиксель. Данная ЦМР представляет собой набор фрагментов размером $1 \times 1^\circ$. Построение водосборов выполнялось в программах QGIS и SAGA GIS следующим образом: соединение фрагментов ЦМР в единый слой, заполнение локальных понижений ЦМР (алгоритм Ванга–Лю), обрезка по береговой линии, применение готовой для работы ЦМР в алгоритме «Сеть водотоков и водоразделы» SAGA GIS. Данный алгоритм определяет линии тока (водотоки) и строит водосборы для водотоков заданного в настройках алгоритма порядка (чем выше порядок — тем крупнее водоток).

Ручной способ выделения водосборов ГИС предполагал оцифровку (нанесение) водораздельных линий по топографической карте. Картографические работы проводились в программе QGIS по растровой подложке топографических карт открытого пользования [7] масштаба 1:50000 и 1:200000 и размещенных в виде тайлов на картографическом сервисе [8].

Точность листов топографической карты масштаба 1:50000 составляет 5–10 м, масштаба 1:200000 — более 20 м [29]. Такая точность считается вполне приемлемой для определения основных морфометрических характеристик водосборов — площадей, средней высоты и др. [30]. Необходимая для проведения работы по определению границ водосборов береговая линия Обской и Тазовской губ была импортирована в векторном формате с геосервиса OpenStreetMap (OSM) [31]. Как показал сравнительный анализ, данный векторный слой OSM хорошо согласовывался с береговой линией на топографической карте. Аналогичная береговая линия, содержащаяся в векторных наборах цифровых карт [32, 33], существенно отклонялась от фактической береговой линии, и расхождения достигали 3,5 км.

При выполнении картографических работ по выделению водосборов анализировался рельеф местности, в том числе отметки высот и урезов воды, речная сеть и направления течения, а также косвенные признаки, способствующие более точному определению местоположения водораздельной линии, — тракторные дороги и зимники, малые формы рельефа, болота и др. При оцифровке создавались элементы полигонального слоя и обязательно соблюдались топологические правила, включая опции прилипания для полигонов, исключающие появление разрывов, перекрытий и самопересечений.

В результате измерений средствами системы QGIS в полигональном векторном слое водосборов были получены значения площадей водосборов для более 200 рек, впадающих в Обскую и Тазовскую губы, включая устьевой участок р. Оби от вершины дельты (м. Салемал) до Ямсальского бара (принятый устьевой створ Оби [3]). Кроме того, по топографическим картам [7] и Реестру государственного каталога географических названий (ГКГН) [34] уточнены названия малых рек, а также приводятся современные наименования рек, обозначенные в справочнике [3] как «без названия».

В соответствии с рекомендациями [35] для окончательного и официально-го принятия цифровых границ водоразделов и определенных значений площадей

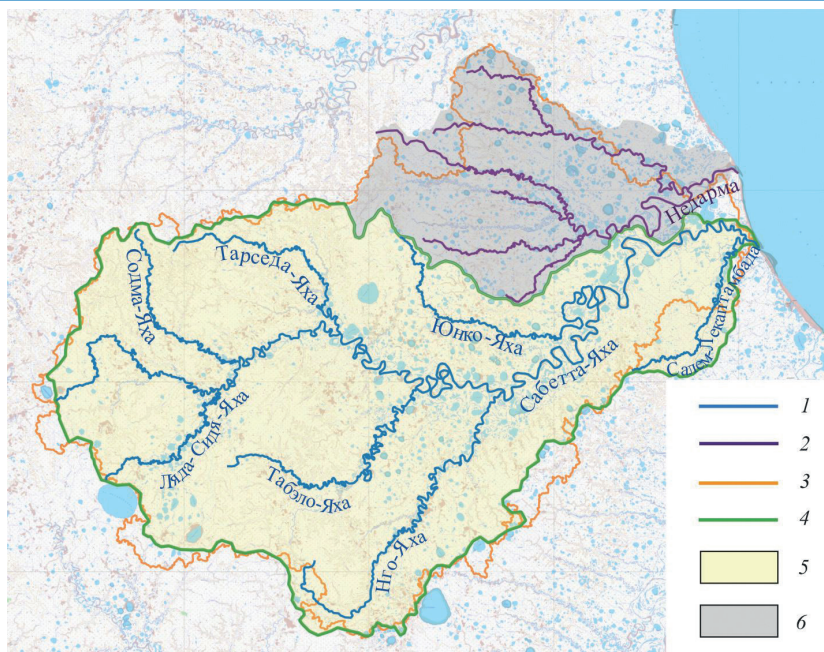


Рис. 3. Выделенные в ГИС водосборы реки Сабетта-Яха:

1 — река Сабетта-Яха с притоками; 2 — река Недарма с притоками; 3 — граница водосбора, выделенная автоматизированным способом; 4 — граница водосбора, выделенная «вручную»; 5 — водосбор р. Сабетта-Яха; 6 — водосбор р. Недарма

Fig. 3. Sabetta-Yakha river catchment areas identified in GIS:

1 — Sabetta-Yakha river with tributaries; 2 — Nedarma river with tributaries; 3 — catchment boundary, built using an automatic method; 4 — catchment boundary, built using a manual method; 5 — catchment area of the Sabetta-Yakha river; 6 — catchment area of the Nedarma river

водосборов следует выполнить повторные аналогичные картографические работы и измерения, а затем сравнить полученные результаты и устранить разночтения.

Сравнение результатов автоматизированного и ручного способа выделения водосборов малых рек, впадающих в Обскую и Тазовскую губы, показало значительные расхождения. В качестве примера на рис. 3 показан водосбор р. Сабетта-Яха, выделенный разными способами.

Очевидно, что в случае автоматизированного определения линии водораздела она во многих местах пересекает водотоки речной системы Сабетта-Яхи. Кроме того, в прибрежной зоне, в 7 км севернее от места впадения Сабетта-Яхи, в Обскую губу впадает соседняя река Недарма, однако алгоритм автоматизированного метода на основе ЦМР не распознает самостоятельный водосбор Недармы и относит его к водосбору Сабетта-Яхи.

Водосборный бассейн Обской и Тазовской губ характеризуется очень низменным рельефом, максимальные высоты на Ямале не превышают 80 м, на Гыданском полуострове — 170 м. Сложный рельеф территории, наличие множества мелких озер и малых водотоков является значительной проблемой для применения автоматических алгоритмов по построению линий водотоков и водосборов. В данном случае опыт использования ЦМР для выделения водосборов показал некорректный



Рис. 4. Водосборы малых рек Обской и Тазовской губ:

1 — водосборы малых рек; 2 — части водосборов Оби, Надыма, Пура и Таза

Fig. 4. Catchment areas of small rivers of the Ob' and Taz Bay:

1 — catchment areas of small rivers; 2 — parts of catchment areas of the Ob', Nadym, Pur and Taz

результат и свидетельствует о необходимости крайне осторожно применять алгоритмы выделения водосборов по ЦМР на слабо расчлененной местности ЯНАО. Для дальнейшего анализа авторы использовали линии водоразделов и значения площадей водосборов, полученные в результате ручной оцифровки.

Таким образом, получены значения площадей водосборов и цифровые границы водосборов рек, впадающих в Обскую и Тазовские губы (рис. 4).

Таблица 3

Сравнение площадей водосборов малых рек Обской и Тазовской губ

Table 3

Comparison of catchment areas of small rivers of the Ob and Taz Bay

Код водного объекта [3]	Река	Площадь водосбора по ГИС, км ²	Площадь водосбора по [3], км ²	Разница, %
Обская губа (левый берег)				
115304278	Хабей-Яха	1210	1230	-1,6
115304317	Нензота-Яха	969	983	-1,4
115304332	Тамбей	4140	4100	1,0
115304405	Сабетта-Яха	1690	1680	0,6
115304432	Вэнуй-Еуо	3740	3770	-0,8
115304500	Турма-Яха	1760	1730	1,7
115304514	Сё-Яха (Зелёная)	4060	4400	-7,7

Код водного объекта [3]	Река	Площадь водосбора по ГИС, км ²	Площадь водосбора по [3], км ²	Разница, %
115304556	Юрибейто-Яха	787	749	5,1
115304561	Ляккато-Сё	5810	5820	-0,2
115304619	Нурма-Яха	1230	1190	3,4
115304649	Сетная	576	588	-2,0
115304665	Паюта-Яха	865	944	-8,4
115304676	Салета	1230	1290	-4,7
115304696	Яда-Яходы-Яха	3530	3850	-8,3
Устьевой участок р. Обь				
115303481	Хадыта-Яха	3590	3650	-1,6
115303408	Щучья	12300	12300	0,0
115303543	Кутоп-Юган	707	715	-1,1
115303550	Шуга	1560	1600	-2,5
Обская губа (правый берег)				
115305225	Сандиба	631	627	0,6
115305235	Ныда	7100	7110	-0,1
115307574	Тадибе-Яха	806	813	-0,9
115307622	Нгарка-Тетнеда-Яха	627	631	-0,6
Тазовская губа (левый берег)				
115305469	Манго-Юрибей	1110	1120	-0,9
115305417	Пойлово-Яха	4920	4800	2,5
115305390	Адер-Паюта	1730	1710	1,2
Тазовская губа (правый берег)				
115307523	Чугорь-Яха	2080	2080	0,0
115307507	Сыды-Яха	1180	1120	5,4
115307494	Нярово-Паюта-Яха	968	971	-0,3
115307473	Тота-Яха	2080	2130	-2,3
115307414	Анти-Паюта-Яха	6380	6640	-3,9
115307225	Мессо-Яха	26400	26000	1,5

В табл. 3 приведены полученные на основе ГИС значения площадей водосборов и справочные значения площадей водосборов [3], используемые в настоящее время в ГВР Росводресурсов.

Сравнение полученных значений площадей водосборов преобладающего большинства рек, впадающих в Обскую и Тазовскую губы, рассчитанные ранее по бумажной основе традиционным способом, показало малое расхождение до 5 %. Для рек Сё-Яха (Зелёная), Юрибейто-Яха, Паюта-Яха, Яда-Яходы-Яха и Сыды-Яха «гисовские» значения площадей на 5–8 % расходятся с соответствующими справочными сведениями [3].

Отметим некоторые трудности картографической работы по установлению границ водосборов малых рек Ямала. Во многих случаях водораздельная линия на равнинной и низменной местности, часто сильно заболоченной, с большим количеством озер, замкнутых впадин и урочищ, проводилась достаточно условно с допущениями до 2 км. Большинство таких территорий расположено в северной части Ямальского и Гыданского полуостровов, на западном побережье Тазовской губы. Именно этими допущениями можно объяснить расхождение в значениях площадей водосборов рек, указанных в табл. 3. При этом чем меньше по площади водосбор реки, тем выше требования к точности топографической карты и, следовательно, требуется более крупный масштаб, чем используемый. Для верного установления

местоположения водораздельной линии, необходимой, например, при проведении инженерных изысканий или строительных работ, рекомендуется привлекать аэрофотоматериалы, космические снимки высокого разрешения, но самым надежным способом уточнения водораздела на слабо расчлененной заболоченной местности остается полевое обследование.

В настоящее время в водохозяйственной деятельности задействованы более 40 малых рек, впадающих в Обскую и Тазовскую губы, их водные ресурсы используются, и сведения о них включаются в АИС ГМВО. Следует отметить, что выборка водных объектов в данной системе производится по водохозяйственным участкам и в соответствии с водохозяйственным районированием [36] к побережью Обской и Тазовской губ выходят семь водохозяйственных участков. В табл. 4 представлены

Таблица 4

Площади водосборов малых рек, информация о которых содержится в АИС ГМВО

Table 4

Catchment areas of small rivers that are available in AIS SWBM

Код водного объекта [3]	Река (название по АИС ГМВО [5])	Река (название по [3])	Река (название по Реестру ГКГН [34])	Площадь водосбора по ГИС, км ²
Водохозяйственный участок 15.02.03.003				
115304311	Надояха	Няду-Яха	Надояха	48,2
115304312	Сабольяха	Саболе-Яха	Сабольяха	207
115304389	Нганорахаяха	Нганораха-Яха	Нганорахаяха	110
115304392	Няхарвангатаояха	Няхар-Вангута-Яха	Няхарванготаяха	78,4
115304394	Недармаяха (Недарма)	Недарма	Недармаяха	477
115304430	Няруйяха (Няруй)	Няруй-Яха	Няруйяха	125
115304482	Юн-Яха	Юн-Яха	Юньяха	695
115304638	Мяоловаяха	Мяолова-Яха	Мяоловаяха	214
115304641	Тарнгынсё	Тар-Нгынсё	Тарнгынсё	200
115304648	Лымбанаяха	Лымбака-Яха	Лымбанаяха	321
115304656	Пясядайяха	Пя-Сядэй-Яха	Пясядайяха	213
115304660	Нго-Яха	Нго-Яха	Нгояха	451
Водохозяйственный участок 15.04.00.002				
115305325	Верх. Паё-Яха	Верх. Паё-Яха	Верхняя Паёяха	61,5
115305341	Нюдя-Монгтоёпоко	Нюды-Монгто-Ёпоко	Нюдя-Монгтоёпоко	132
	Нюдя-Адлюдрёпоко	Нюды-Адлюдр-Ёпоко	Нюдя-Адлюдрёпоко	206
115305456	Поерянг	Поерянг	Поерянг	745
115305477	Юрхарово	Юрхарово	Юрхарово	270
115305480	Хэйбидяпаёта	Хэйбидэ-Паюта	Хэбидяпаёта	70,6
Водохозяйственный участок 15.04.00.001				
115306324	Салаякаптан	Сале-Каптан	Салаякаптан	414
Водохозяйственный участок 15.05.00.002				
115307221	Паётаяха	Паюта-Яха	Паётаяха	81,2
115307593	Парэйлага-Яха	Парэйлага-Яха	Парэйлакьяха	64,8
115307594	Нядай-Пынче	Нядай-Пынче	Нядайпынгчэ	65,4
115307595	Халцанаяха	Халцыней-Яха	Халцанаяха	208
115307617	Нярсу-яха	Нярсу-Яха	Нярсёяха	32,3

реки, упоминаемые в АИС ГМВО с учетом их расположения по водохозяйственным участкам, и вычисленные площади водосборов. Как указывалось выше, для этих рек значения площадей водосборов до сих пор не были установлены.

Дополнительные трудности при анализе гидрологической информации о малых реках создают разночтения в названиях рек, приводимых на картах, употребляемых в справочниках, литературе и информационных источниках, что определяется особенностями топонимики ЯНАО. Как видно из табл. 4, названия рек, информация по морфометрическим характеристикам которых помещается водопользователями в АИС ГМВО, зачастую расходятся с названиями рек в Гидрологической изученности [3] и в Реестре ГКГН [34]. Поэтому в АИС ГМВО для гидронимов необходимо проводить критический анализ информации водопользователей. Крайне важно на межведомственном уровне определить названия рек по Реестру ГКГН и привести названия рек в АИС ГМВО в соответствие с Реестром ГКГН.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлена ретроспектива наблюдений за водным стоком малых рек, впадающих в Обскую и Тазовскую губы. Стационарные наблюдения за стоком на исследуемых реках не проводятся. Обобщена информация об измеренных расходах воды по фондовым экспедиционным материалам ААНИИ, впервые представлены сведения об экспедиционных наблюдениях ААНИИ 2012–2013 гг., в том числе на р. Сабетта-Яха. В современный процесс водопользования включены более 40 малых рек. Данные наблюдений водопользователей, размещенных в АИС ГМВО Росводресурсов, являются спорными и требуют критического анализа и проверки на достоверность.

Получены линии водоразделов малых рек с помощью ГИС, определены площади их водосборов. Автоматизированная оцифровка по ЦМР показала некорректный результат, который нуждается в проверке. Оцифровка водосборов «вручную», несмотря на свою трудоемкость, эффективна при определении границ водосборов для низменного рельефа Ямало-Гыданского региона и дает достаточно надежные результаты при расчете значений площадей.

Особые сложности возникают в употреблении названий малых рек, которые различаются в разных источниках. Необходимо согласование для единого и однозначного использования названий рек в ГВР и Реестре ГКГН.

Реки, впадающие в Обскую и Тазовскую губы, практически не изучены, но находятся под значительным антропогенным воздействием. Поэтому в современных условиях необходима организация государственного мониторинга на малых реках с обязательным измерением расходов воды, в первую очередь на реках, обеспечивающих хозяйственные объекты пресной водой, Сабетта-Яха, Сё-Яха, Мессо-Яха.

Кроме непосредственных наблюдений за водным стоком, которые являются основой рационального и экологически ориентированного водопользования, перспективны методы оценки стока с помощью математического моделирования и дистанционного зондирования Земли. Примером моделирования формирования стока местного водосбора Обской и Тазовской губ может служить работа [37], в которой для задания граничных условий гидродинамической модели Обской губы сток 196 рек, непосредственно впадающих в губу, рассчитан с использованием гидрологической воднобалансовой модели WBM (Water Balance Model), разработанной в Университете Нью-Гэмпшира [38]. Однако данные моделирования все же должны подтверждаться данными натурных наблюдений.

Спутниковая информация позволяет отслеживать характеристики снежного покрова, включая толщину снега и запас воды в нем. Эти данные необходимы для определения объемов стока талых вод с водосборов неизученных рек, величин максимальных расходов воды, сезонной изменчивости границ и площади снежного покрова и т. п. Ключевым моментом при использовании спутниковой информации, определяющим точность получаемых результатов, является наличие расчетной зависимости, обеспечивающей пересчет соответствующей спутниковой информации в значения характеристик гидрологического режима. Эта проблема решается путем организации подспутниковых наблюдений. Собранные экспедиционные материалы могут быть использованы для верификации спутниковых данных. Важно отметить, что исследуемый район — северная часть ЯНАО — располагается в равнинной тундровой зоне. Это существенно повышает надежность получаемых данных в отличие от лесной зоны и гористых районов, для которых требуется дополнительная калибровка спутниковых данных по наземным наблюдениям [39].

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках темы 2.2 Плана НИТР Росгидромета на 2022 г.

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

Funding. The research was funded within project 2.2 of Roshydromet Plan NITR 2022.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Войнов Г.Н., Налимов Ю.В., Пискун А.А., Становой А.А., Усанкина Г.Е. Основные черты гидрологического режима Обской и Тазовской губ (лед, уровни, структура воды) / Под ред. д-ра геогр. наук Г.Н. Войнова. СПб.: Нестор-История, 2017. 192 с.
2. Третьяков М.В. Климатические и антропогенные изменения запасов пресных вод в устьевых областях крупных рек бассейна Карского моря // Вопросы географии. № 145. Гидрологические изменения. М.: Издательский дом «Кодекс», 2018. С. 252–264.
3. Ресурсы поверхностных вод СССР. Гидрологическая изученность. Т. 15. Алтай и Западная Сибирь. Вып. 3. Нижний Иртыш и Нижняя Обь. Л.: Гидрометеиздат, 1964. 434 с.
4. Муждаба О.В., Трунин А.А. База данных «Состояние гидрометеорологической сети за период инструментальных наблюдений в Арктической зоне РФ (версия 1.0)». Свидетельство о регистрации базы данных RU 2019620824. 22.05.2019. // Бюл. Роспатента «Программы для ЭВМ. Базы данных. Топология интегральных микросхем». 2019. № 6.
5. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов. URL: <https://gmvo.skniivh.ru> (дата обращения: 05.02.2022).
6. Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER). URL: <https://asterweb.jpl.nasa.gov/data.asp> (дата обращения: 14.08.2022).
7. Федеральный портал пространственных данных. URL: <https://portal.fppd.cgkipd.ru/main> (дата обращения: 09.02.2022).
8. Картографический сервис растровых тайлов. URL: <https://tiles.nakarte.me> (дата обращения: 09.02.2022).
9. Чеботарев А.И. Гидрологический словарь. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 308 с.
10. Доронина Н.А. Влияние физико-географических факторов на формирование гидрографической сети Обского Севера // Труды ААНИИ. 1972. Т. 297. С. 75–85.

11. Гидрология заболоченных территорий зоны многолетней мерзлоты Западной Сибири / Под ред. С.М. Новикова. СПб.: ВВМ, 2009. 536 с.
12. Ямало-Гыданская область (физико-географическая характеристика) / Под ред. канд. геогр. наук Р.К. Сиско. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 308 с.
13. *Стеженская И.Н.* Сезонный сток рек Западно-Сибирской равнины. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 68 с.
14. Природа Ямала. Екатеринбург: УИФ «Наука», 1995. 495 с.
15. СП 33-101-2003. Свод правил. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. М., 2004. 73 с.
16. *Воскресенский О.Б.* Формирование максимального стока рек и малых водотоков полуострова Ямал // Geoinfo.ru. URL: <https://www.geoinfo.ru/products-pdf/formirovanie-maksimalnogo-stoka-tek-i-malyh-vodotokov-poluostrova-yamal.pdf> (дата обращения: 14.08.2022).
17. *Житков Б.М.* Полуостров Ямал // Записки Императорского Русского географического общества. Т. 49. СПб., 1913. 349 с.
18. *Бородулин В.В., Грязева Л.И.* Результаты гидрологических исследований на реках полуострова Ямал по материалам дистанционных наблюдений // Метеорология и гидрология. 1991. № 3. С. 86–94.
19. *Оношко В.А.* Комплексная арктическая экспедиция морского базирования «Ямал-Арктика 2012»: общие сведения // Российские полярные исследования. 2012. № 4 (10). С. 26–31.
20. *Федорова И.В., Скороспехова Т.В., Оношко В.А.* Гидроэкологические исследования водоемов полуострова Ямал в рамках экспедиции «Ямал-Арктика 2012» // Российские полярные исследования. 2012. № 4 (10). С. 41–43.
21. Западная Сибирь / Отв. ред. Г.Д. Рихтер. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 488 с.
22. *Куприянова Е.И.* Водный баланс районов Западной Сибири и его изменения в связи с хозяйственным освоением территории // Проблемы Севера. 1963. Вып. 7. С. 162–171.
23. *Дрейер Н.Н.* Карта полного речного стока с территории Советского Союза // Известия Академии наук СССР. Сер. географическая. 1969. № 6. С. 69–73.
24. *Плиткин Г.А.* Водный баланс Западной Сибири // Труды Государственного гидрологического института. 1976. Вып. 228. 247 с.
25. Атлас расчетных гидрологических карт и номограмм (Приложение 1 к «Пособию по определению расчетных гидрологических характеристик»). Л.: Гидрометеиздат, 1986. 25 л.
26. *Гопченко Е.Д., Лобода Н.С., Яготинцева Т.В.* Расчет характеристик годового стока рек полуострова Ямал // Проблемы Арктики и Антарктики. 1995. Вып. 69. С. 108–115.
27. Атлас Ямало-Ненецкого автономного округа. Омск: Омская картографическая фабрика, 2004. 303 с.
28. Российская Арктика. Пространство, время, ресурсы: атлас / ПАО «НК «Роснефть»». М.: Фонд «НИР», ООО «Феория», 2019. 796 с.
29. СТО ГГИ 52.08.48-2020. Выбор цифровой картографической основы для определения гидрографических характеристик. СПб.: ГГИ, 2020. 79 с.
30. СТО ГГИ 52.08.40-2017. Определение морфометрических характеристик водных объектов суши и их водосборов с использованием технологии географических информационных систем по цифровым картам Российской Федерации и спутниковым снимкам. СПб.: ГГИ, 2017. 140 с.
31. OpenStreetMap (OSM). URL: <https://www.openstreetmap.org/copyright> (дата обращения: 09.02.2022).
32. Цифровая картографическая основа Digital Chart of the World (VMap0). ESRI. URL: <https://gis-lab.info/qa/vmap0-code.html> (дата обращения: 09.02.2022).

33. Общая цифровая картографическая основа для применения в информационных системах и комплексах Росгидромета (ЦКО Росгидромета). Версия 1.0. Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ–МЦД», 2014. 34 с.
34. Государственный каталог географических названий. Реестр зарегистрированных в АГКГН географических названий объектов на 21.06.2022. Ямало-Ненецкий автономный округ. URL: <https://cgkipd.ru/science/names/reestry-gkggn.php> (дата обращения: 14.08.2022).
35. Р 52.08.874-2018. Определение гидрографических характеристик картографическим способом. СПб.: ГГИ, 2017. 172 с.
36. Водохозяйственное районирование территории Российской Федерации: Нижнеобский бассейновый округ. М.: НИИ-Природа, 2008. 28 с.
37. Третьяков М.В., Шикломанов А.И. Оценка влияния на гидрологические процессы в Обской губе климатических и антропогенных изменений на ее водосборе // Водные ресурсы. 2022. Т. 49. № 5. С. 608–624. doi: 10.31857/S0321059622050169.
38. Wisser D., Fekete B.M., Vörösmarty C.J., Schumann A.H. Reconstructing 20th century global hydrography: a contribution to the Global Terrestrial Network — Hydrology (GTN-H) // Hydrology and Earth System Sciences. 2010. V. 14. P. 1–24. doi: 10.5194/hessd-6-2679-2009.
39. Armstrong R.L., Brodzik M.J. Recent northern hemisphere snow extent: A comparison of data derived from visible and microwave satellite sensors // Geophysical Research Letters. 2001. V. 28. No. 19. P. 3673–3676. doi: [org/10.1029/2000GL012556](https://doi.org/10.1029/2000GL012556).

REFERENCES

1. Voinov G.N., Nalimov Iu.V., Piskun A.A., Stanovoi A.A., Usankina G.E. *Osnovnye cherty gidrologicheskogo rezhima Obskoi i Tazovskoi gub (led, urovni, struktura vody)*. Main features of hydrological regime of the Ob' and Taz Bay (ice, levels, water structure). Edited by Dr. G.N. Voinov. St. Petersburg: Nestor-Istoriia, 2017: 192 p. [In Russian].
2. Tret'iakov M.V. Climatic and anthropogenic changes in freshwater reserves in the estuaries of major rivers in the Kara Sea basin. *Voprosy geografii. № 145. Gidrologicheskie izmeneniia*. Geography Matters. № 145. Hydrological changes. Moscow: Publ. house "Codex", 2018: 252–264. [In Russian].
3. *Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. Gidrologicheskaya izuchennost'.* T/ 15. *Altai i Zapadnaia Sibir'.* Вып. 3. *Nizhnii Irtysh i Nizhniaia Ob'.* Surface water resources of the USSR. Hydrological knowledge. V. 15. Altai and Western Siberia. Iss. 3. Lower Irtysh and Lower Ob. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1964: 434 p. [In Russian].
4. Muzhdaba O.V., Trunin A.A. *Baza dannykh "Sostoianie gidrometeorologicheskoi seti za period instrumental'nykh nabliudeni v Arkticheskoi zone RF (versii 1.0)"* Database "State of hydrometeorological network for the instrumental observations period in the Arctic zone of the Russian Federation (version 1.0)". Patent RF, no. RU 2019620824. 2019.
5. *Avtomatizirovannaiia informatsionnaia sistema gosudarstvennogo monitoringa vodnykh ob'ektov*. Automated information system for state water body monitoring. Available at: <https://gmvo.skniihv.ru> (accessed 05.02.2022).
6. Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER). Available at: <https://asterweb.jpl.nasa.gov/data.asp> (accessed 14.08.2022).
7. *Federal'nyi portal prostranstvennykh dannykh*. The federal spatial data portal. Available at: <https://portal.fppd.cgkipd.ru/main> (accessed 09.02.2022).
8. *Kartograficheskii servis rastrovnykh tailov*. A map service of raster tiles. Available at: <https://tiles.nakarte.me> (accessed 09.02.2022).
9. Chebotarev A.I. *Gidrologicheskii slovar'.* Hydrological Dictionary. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1978: 308 p. [In Russian].

10. Doronina N.A. Influence of physiographic factors on the formation of the hydrographic network of the Ob' North. *Trudy Arkticheskogo i antarkticheskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta*. Proc. of AARI. 1972, 297: 75–85. [In Russian].
11. *Gidrologiia zabolochennykh territorii zony mnogoletnei merzloty Zapadnoi Sibiri*. Hydrology of wetland areas in the permafrost zone of Western Siberia. Edited by S.M. Novikov. St. Petersburg: VVM, 2009: 536 p. [In Russian].
12. *Iamalo-Gydanskaia oblast' (fiziko-geograficheskaiia kharakteristika)*. Yamal-Gydan region (physiographic characteristics). Edited by R.K. Sisko. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1977: 308 p. [In Russian].
13. *Stezhenskaia I.N. Sezonnyi stok rek Zapadno-Sibirskoi ravнины*. Seasonal river runoff of the West Siberian Plain. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1971: 68 p. [In Russian].
14. *Priroda Iamala*. Yamal Nature. Yekaterinburg: UIF "Nauka", 1995: 495 p. [In Russian].
15. SP 33-101-2003. Code of Practice. Determination of basic calculated hydrological characteristics. Moscow, 2004: 73 p. [In Russian].
16. *Voskresenskii O.B. Formirovanie maksimal'nogo stoka rek i malykh vodotokov poluostrova Iamal*. The maximum runoff formation of rivers and small streams of the Yamal Peninsula. Geoinfo.ru. Available at: <https://www.geoinfo.ru/products-pdf/formirovanie-maksimalnogo-stoka-rek-i-malykh-vodotokov-poluostrova-yamal.pdf> (accessed 14.08.2022). [In Russian].
17. *Zhitkov B.M. Yamal Peninsula. Zapiski Imperatorskogo Russkogo geograficheskogo obshchestva*. Notes of the Imperial Russian Geographical Society. V. 49. St. Petersburg, 1913: 349 p. [In Russian].
18. *Borodulin V.V., Griazeva L.I.* Results of hydrological studies on the rivers of the Yamal Peninsula based on the remote observations materials. *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and Hydrology. 1991, 3: 86–94. [In Russian].
19. *Onoshko V.A.* Complex Arctic Sea-Based Expedition "Yamal-Arctic 2012": Overview. *Rossiiskie poliarnye issledovaniia*. Russian Polar Investigations. 2012, 4 (10): 26–31. [In Russian].
20. *Fedorova I.V., Skorospelkova T.V., Onoshko V.A.* Hydro-ecological studies of water bodies on the Yamal Peninsula as part of the Expedition "Yamal-Arctic 2012". *Rossiiskie poliarnye issledovaniia*. Russian Polar Investigations. 2012, 4 (10): 41–43. [In Russian].
21. *Zapadnaia Sibir'*. Western Siberia. Edited by G.D. Richter. Moscow: Publ. of USSR Academy of Sciences, 1963: 488 p. [In Russian].
22. *Kupriianova E.I.* Water balance of Western Siberia and its changes due to economic development of the territory. *Problemy Severa*. Problems of the North. 1963, 7: 162–171. [In Russian].
23. *Dreier N.N.* Map of total river runoff from the Soviet Union territory. *Izvestia Akademii nauk SSSR. Ser. geograficheskaiia*. Proc. of the USSR Academy of Sciences. Geographic Series. 1969, 6: 69–73. [In Russian].
24. *Plitkin G.A.* Water balance of Western Siberia. *Trudy Gosudarstvennogo gidrologicheskogo instituta*. Proc. of the State Hydrological Institute. 1976, 228: 247 p. [In Russian].
25. *Atlas raschetnykh gidrologicheskikh kart i nomogramm (Prilozhenie 1 k "Posobiu po opredeleniiu raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik")*. Atlas of Calculated Hydrological Maps and Nomograms (Annex 1 to the "Manual for Determining Calculated Hydrological Characteristics"). Leningrad: Hydrometeoizdat, 1986: 25 p. [In Russian].
26. *Gopchenko E.D., Loboda N.S., Iagotintseva T.V.* Estimation of the annual runoff characteristics of the Yamal Peninsula rivers. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of Arctic and Antarctic. 1995, 69: 108–115. [In Russian].
27. *Atlas Iamalo-Nenetskogo avtonomnogo okruga*. Atlas of Yamalo-Nenets Autonomous Okrug. Omsk: Omsk Cartographic Factory, 2004: 303 p. [In Russian].

28. Rossiiskaia Arktika. Prostranstvo, vremia, resursy: atlas. Russian Arctic. Space, time, resources: atlas. Rosneft. Moscow: NIR Foundation, Theoria LLC, 2019: 796 p. [In Russian].
29. STO GGI 52.08.48-2020. Selection of a digital mapping framework for hydrographic characteristics. St. Petersburg: SHI, 2020: 79 p. [In Russian].
30. STO GGI 52.08.40-2017. Determination of morphometric characteristics of surface water bodies and their catchments using geographic information system technology from digital maps of the Russian Federation and satellite images. St. Petersburg: SHI, 2017: 140 p. [In Russian].
31. OpenStreetMap (OSM). Available at: <https://www.openstreetmap.org/copyright> (accessed 09.02.2022).
32. Digital Chart of the World (VMap0) digital mapping framework. ESRI. Available at: <https://gis-lab.info/qa/vmap0-code.html> (accessed 09.02.2022).
33. Obshchaia tsifrovaia kartograficheskaia osnova dlia primeneniia v informatsionnykh sistemakh i kompleksakh Rosgidrometa (TsKO Rosgidrometa). Versiia 1.0. A common digital mapping base for use in Roshydromet information systems and complexes (Roshydromet DMC). Version 1.0. Obninsk: FGBU VNIIGMI-MDC, 2014: 34 p. [In Russian].
34. Gosudarstvennyi katalog geograficheskikh nazvanii. Reestr zaregistrirovannykh v AGKGN geograficheskikh nazvanii ob"ektov na 21.06.2022. Iamalo-Nenetskii avtonomnyi okrug. State Catalogue of Geographical Names. The register of geographical names of the objects registered in the State Catalogue of Geographical Names as of 21.06.2022. Yamalo-Nenets Autonomous Okrug. Available at: <https://cgkipd.ru/science/names/reestry-gkgn.php> (accessed 14.08.2022).
35. R 52.08.874-2018. Determination of hydrographic characteristics by cartographic method. St. Petersburg: SHI, 2017: 172 p. [In Russian].
36. Vodokhoziaistvennoe raionirovanie territorii Rossiiskoi Federatsii: Nizhneobskii basseinovyi okrug. Water Zoning of the Russian Federation Territory: Nizhneobskiy Basin Region. Moscow: NIA–Priroda, 2008: 28 p. [In Russian].
37. Tret'iakov M.V., Shiklomanov A.I. Assessment of the influence of climatic and anthropogenic changes on hydrological processes in the catchment area in the Gulf of Ob. *Vodnye resursy*. Water Resources. 2022, 49 (5): 608–624. doi: 10.31857/S0321059622050169. [In Russian].
38. Wisser D., Fekete B.M., Vörösmarty C.J., Schumann A.H. Reconstructing 20th century global hydrography: a contribution to the Global Terrestrial Network — Hydrology (GTN-H). *Hydrology and Earth System Sciences*. 2010, 14: 1–24. doi:10.5194/hessd-6-2679-2009.
39. Armstrong R.L., Brodzik M.J. Recent northern hemisphere snow extent: A comparison of data derived from visible and microwave satellite sensors. *Geophysical Research Letters*. 2001, 28 (19): 3673–3676. doi: org/10.1029/2000GL012556.

ЛЕДОТЕХНИКА ICE TECHNOLOGY

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-1-91-105>
УДК 551.326.7



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

Особенности выбора сценариев ледовых условий для модельных исследований в обеспечение промышленного освоения Обской губы

А.А. Добродеев^{1,2}, К.Е. Сазонов^{1,2*}

¹ — ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

² — ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», Санкт-Петербург, Россия

*kirsaz@rambler.ru

Резюме

Обская губа уже давно стала основным центром развития российской нефтяной промышленности в Арктическом регионе. Стремительный рост судоходства и активное создание портовой инфраструктуры в этой акватории являются неотъемлемой частью стратегии по развитию Российской Арктики. В статье описаны исследования, выполненные в ледовом бассейне Крыловского государственного научного центра в течение последних двадцати лет в обеспечение проектирования и эксплуатации различных технических объектов, предназначенных для промышленного освоения Обской губы. В выполненных работах можно выделить два основных направления исследований — это взаимодействие судов и инженерных сооружений с ледяными образованиями, характерными для Обской губы. В работе подчеркивается существенная зависимость возможности проведения в ледовом бассейне экспериментов и их адекватного анализа от качества исходных данных, в первую очередь по гидрологии и ледовым характеристикам внешней среды.

Ключевые слова: дрейф, ледовый бассейн, ледяной покров, Обская губа, торос, физическое моделирование.

Для цитирования: Добродеев А.А., Сазонов К.Е. Особенности выбора сценариев ледовых условий для модельных исследований в обеспечение промышленного освоения Обской губы // Проблемы Арктики и Антарктики. 2023. Т. 69. № 1. С. 91–105. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-1-91-105>.

Поступила 15.02.2023

После переработки 12.03.2023

Принята 13.03.2023

The choice of ice conditions for ice model tests to support the industrial development of the Ob' Bay

Aleksei A. Dobrodeev^{1,2}, Kirill E. Sazonov^{1,2*}

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

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

*kirsaz@rambler.ru

Summary

The Ob' Bay has long been the main center for the development of the Russian oil industry in the Arctic region. The rapid growth of shipping and the active creation of port infrastructure in this area are an integral part of the strategy for the development of the Russian Arctic. The main feature of the hydrometeorological regime of the Ob' Bay is the annual presence of ice for a long time. Determining the ice performance of icebreakers, tugboats and heavy-tonnage vessels designed for the region, as well as ice loads on marine platforms and hydraulic structures, is a most important task in the creation thereof.

The paper describes research carried out in the ice model tank of the Krylov State Research Centre over the past twenty years. The research supports the design and operation of new technical facilities intended for the industrial development of the Ob' Bay. In the completed study, two main areas of research can be distinguished, namely the interaction of ships and engineering structures with ice formations in the Ob' Bay. The paper emphasizes a significant dependence of the possibility of conducting ice tests and proper analysis of findings on the quality of the initial data, primarily hydrology and ice parameters.

The results of ice model tests analysis, especially the ice impact on offshore and hydraulic structures for the Ob' Bay, show the need to change approaches to determining theoretical ice loads and, as a result, to expand ice model testing programs. The simulation of the worst-case scenario, when all ice parameters are determined for a given probability and are not consistent with each other, leads to a significant overestimation of ice loads and the physical modeling of unrealistic combinations of ice conditions.

Each ice impact scenario should contain the maximum value of only one main ice parameter corresponding to the probability. The main ice parameters include the thickness, the flexural strength or compression strength and the speed of ice drift. In this case, ice parameters should be selected in accordance with the chosen main one in the modeling scenario. It should not be the result of the same maximum value calculation for the given observation period as for the main ice parameter.

Keywords: ice model tank, ice moving, ice sheet, physical modelling, ridge, the Ob' Bay.

For Citation: Dobrodeev A.A., Sazonov K.E. The choice of ice conditions for ice model tests to support the industrial development of the Ob' Bay. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2023, 69 (1): 19–105. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-1-91-105>.

Received 15.02.2023

Revised 12.03.2023

Accepted 13.03.2023

ВВЕДЕНИЕ

С начала XXI в. происходит планомерное промышленное освоение полярных регионов России. В наибольшей степени это касается Обской губы, берега и дно которой содержат большое количество месторождений углеводородов. Именно в Обской губе были реализованы такие крупные проекты, как строительство порта в поселке Сабетта, «Ворота Арктики», в настоящее время проводятся работы в рамках проектов «Арктик СПГ 2» (терминал «Утренний»), «Каменомысское-море» и др.

Большинство из указанных проектов освоения ориентированы на вывоз добываемого углеводородного сырья морским транспортом. Это обстоятельство опреде-

лило основные направления исследований, осуществляемых с помощью проведения модельного эксперимента в ледовом бассейне ФГУП «Крыловский государственный научный центр» (КГНЦ). Основные работы лаборатории были направлены на изучение особенностей взаимодействия современных крупнотоннажных судов со льдом в специфических условиях Обской губы. Другим направлением работ было определение ледовой нагрузки на различные варианты гидротехнических портовых сооружений. Изучались также вопросы определения ледовой нагрузки на пришвартованные суда.

Многие из этих работ были выполнены благодаря постройке в 2014 г. нового ледового бассейна взамен старого [1]. По своим характеристикам он существенно отличается от предыдущей лаборатории. На рис. 1 видны существенные различия в размерах чаши опытовых бассейнов. Длина моделируемого ледяного поля возросла с 35 до 80 м, а ширина — с 6 до 10 м. В дне бассейна появились обзорные иллю-



Рис. 1. Ледовые опытовые бассейны КГНЦ. Слева — ледовый бассейн, построенный в 1980 г.; справа — ледовый бассейн, построенный в 2014 г.

Fig. 1. Ice tanks of Krylov State Research Centre. On the left — ice tank built in 1980; on the right — ice tank built in 2014.

минаторы. Диапазон скоростей тележки вырос более чем в два раза и составляет от 1 мм/с до 1,5 м/с. Эти изменения стали толчком для проведения большого количества новых работ по изучению воздействия льда на гидротехнические сооружения, а также ходовых и маневренных качеств крупнотоннажных судов.

Основной спецификой экспериментальных исследований морских объектов для Обской губы, полноценное выполнение которых стало возможным благодаря вводу в эксплуатацию уникального нового ледового бассейна, являются размеры сооружений и сложные характеристики ледовых условий. К примеру, для вывоза из этой акватории сжиженного природного газа был построен крупнейший арктический танкер класса ЯмалМакс. Для такого типа судов впервые в мире осуществлялось моделирование движения под проводкой ледоколов в морском канале, маневрирования в условиях сжатий, работы на мелководе. Другими типами исследуемых сооружений являются морские причалы, ледозащитные сооружения, подходные дамбы, основания гравитационного типа, и они также обладают внушительными размерами. Моделирование воздействия на них льда с соблюдением всех основных критериев подобия потребовало создания новых методик и технологий проведения экспериментов, не существовавших ранее и возможных к применению только в современной лаборатории. Особую роль в моделировании играет воспроизведение реальных ледовых условий. Впервые в работах по Обской губе большое внимание было уделено происхождению и влиянию на судоходство тертого льда, образующегося в акваториях портов и ледяных каналах [2]. Новые технологии моделирования тертого льда в ледовых бассейнах создали предпосылки к проектированию абсолютно новых типов ледокольных судов [3].

В данной статье особый акцент сделан именно на моделировании ледовых условий, в частности, обозначена проблема выбора расчетных сценариев ледового воздействия на проектируемые объекты морской техники. На основании обзора работ, выполненных в ледовом бассейне КГНЦ, показана эффективность применения метода физического моделирования для решения конкретных проектных задач, связанных с освоением Обской губы. Целью анализа выполненных работ по физическому моделированию, особенно взаимодействия льда с морскими и гидротехническими сооружениями для Обской губы, стало обоснование необходимости изменения подходов к выбору расчетных характеристик льда и, как следствие, расширения программ экспериментальных исследований. Опыт проведения модельных испытаний показывает, что выбор и моделирование наихудшего сценария в качестве расчетного, когда все характеристики льда определены независимо друг от друга для заданной ежегодной вероятности их превышения в соответствии с классом сооружения, приводят к существенному завышению уровня ледовых нагрузок и воспроизведению малореалистичных комбинаций ледовых условий.

ОСОБЕННОСТИ ИЗУЧЕНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛЬДА НА СУДА

Модельные исследования ледовой ходкости судов в обеспечение их проектирования базируются на воссоздании в ледовом бассейне некоторых, так называемых эталонных ледовых условий, которые характерны практически для любых полярных и замерзающих морей [4]. Поэтому, как правило, учет специфических особенностей того или иного полярного региона при проектировании ледоколов и судов ледового плавания не проводится. Сказанное выше в полной мере относится и к проектированию современных крупнотоннажных судов ледового плавания, предназначенных для перевозки СПГ или нефти [5].

Тем не менее в некоторых случаях учет специфических особенностей региона оказывается важным не только для проектирования судов, но и для обеспечения их эффективной эксплуатации. Ниже приводятся два соответствующих примера.

Моделирование работы судов в условиях порта Сабетта

В ледовом бассейне КГНЦ выполнялись работы по исследованию ледовой ходкости двух буксиров, которые проектировались для работы в порту Сабетта. При отрицательных температурах воздуха на акватории порта из-за постоянного движения судов образуется толстый слой тертого льда, который оказывает негативное влияние на возможность выполнения различных технологических операций. Кроме этого, тертый лед образуется в подходных к порту каналах, также препятствуя движению судов. Этой проблеме посвящено довольно большое количество публикаций [6–9]. Краткий обзор физических свойств тертого льда содержится в работе [2], а особенности взаимодействия судов с этим ледяным образованием описаны в работе [3].

При проведении модельных испытаний пристальное внимание было уделено исследованию движения буксиров в тертом льду, для создания которого в ледовом бассейне КГНЦ была создана специальная установка [4]. Особый интерес представляло изучение возможности движения буксира в слое тертого льда, толщина которого превышала 2,0 м. Такие ледовые условия характерны для портов и ледяных каналов Обской губы. Испытания проводились при движении модели как передним, так и задним ходом. На рис. 2 приведены надводные и подводные фотографии, полученные при буксировке самоходной модели по каналу, забитому тертым льдом.

Результаты испытаний убедительно показали, что в указанных тяжелых условиях проектируемые буксиры могут успешно выполнять свои функции. Достижимая скорость таких судов составляет чуть более 5,0 узлов в тертом льду толщиной 2,5 м. Последующая эксплуатация буксиров в порту полностью подтвердила полученные выводы.

Среди вопросов, связанных с движением судов в портовых акваториях, стоит отметить исследования по изучению взаимодействия пришвартованного к причалу судна с движущимся мимо него другим судном, когда между ними находится слой тертого льда. В результате этих исследований было показано, что если расстояния между корпусами больше примерно удвоенной ширины движущегося судна, то существенных воздействий на пришвартованное судно не наблюдается. Эти выводы легли в основу выбора расстояния от разворотного круга и подходных каналов до причалов порта Сабетта.



Рис. 2. Испытания модели буксира для порта Сабетта в канале с тертым льдом: а — вид сверху; б — взаимодействие подводной поверхности буксира с тертым льдом

Fig. 2. Ice model tests of a tug for the port of Sabetta in brash ice channel: а — top view; б — interaction between hull and brash ice

Моделирование эксплуатации судов в Морском канале Обской губы

Другим примером применения метода модельного эксперимента к изучению влияния специфических условий Обской губы является изучение движения крупнотоннажного судна в условиях дрейфа льда. Рассматриваемая ситуация соответствует условиям прохождения таким судном Морского канала. Транспортные системы, обеспечивающие вывоз углеводородного сырья из Обской губы, в настоящее время испытывают некоторые затруднения в зимний период при обеспечении движения крупнотоннажных судов по Морскому каналу. Эти затруднения связаны с дрейфом льда, который приводит к изменению курса судна, что в условиях открытого моря не представляет никакой опасности. При движении же судна по каналу, ширина которого ограничена, дрейф льда может стать причиной посадки судна на мель.

В зимнее время движение крупнотоннажных судов, как правило, осуществляется под проводкой ледоколов, при этом они осуществляют движение по проложенному каналу, взаимодействуя с его кромками. В морской практике хорошо известно, что изменение курса, вызванное дрейфом судна, можно компенсировать, двигаясь с соответствующим углом дрейфа. В модельном эксперименте, выполненном в ледовом бассейне КГНЦ, изучалось ледовое сопротивление крупнотоннажного судна (на примере газовоза класса ЯмалМакс) при его движении по ледяному узкому каналу с упреждением на дрейф.

В процессе проведения экспериментальных исследований моделировались поля дрейфующего под углом 90 градусов льда к направлению движения судна. Эти поля представляли собой сплошной ровный и крупнобитый сплоченный лед, в котором моделью ледокола был проложен канал. Такая методика приготовления ледяного канала соответствует рекомендациям Ледового комитета Международной конференции опытовых бассейнов [10]. Также в качестве исходных данных принято, что судно движется не только в условиях дрейфующего льда, но и под воздействием сжатий. Ширина канала за ледоколом в этом случае постепенно уменьшается. Как результат, моделируется движение судна в ледяном канале, ширина которого меньше, чем ширина канала, проложенного ледоколом.

Закрытие ледяного канала характеризуется скоростью смыкания кромок. Эта скорость связана с балльностью сжатия зависимостью, которую экспериментально получил А.Т. Казаков [11] и которая может быть в первом приближении аппроксимирована выражением [12]:

$$V_p = 0,005s + 0,03782s^2, \text{ м/с},$$

где V_p — скорость смыкания кромок канала; s — балльность сжатия.

В ходе эксперимента моделировался как дрейф льда, так и закрытие канала. Скорость закрытия канала была выбрана 0,05 м/с. В среднем безопасная дистанция между ледоколом и судном составляет от 1 (при сплоченности 6–8 баллов) до 2,5 кбт. Основываясь на этих данных, в экспериментах было принято, что ширина канала, по которому движется крупнотоннажное судно, составляет 24 м. Эксперименты проводились для двух толщин льда равных 1,5 и 2,0 м. На рис. 3 приведены фотографии, полученные при буксировке самоходной модели по каналу с углом дрейфа.

Результаты обработки полученных экспериментальных данных представлены на рис. 4. Их анализ показывает, что движение с углом дрейфа в условиях дрейфу-

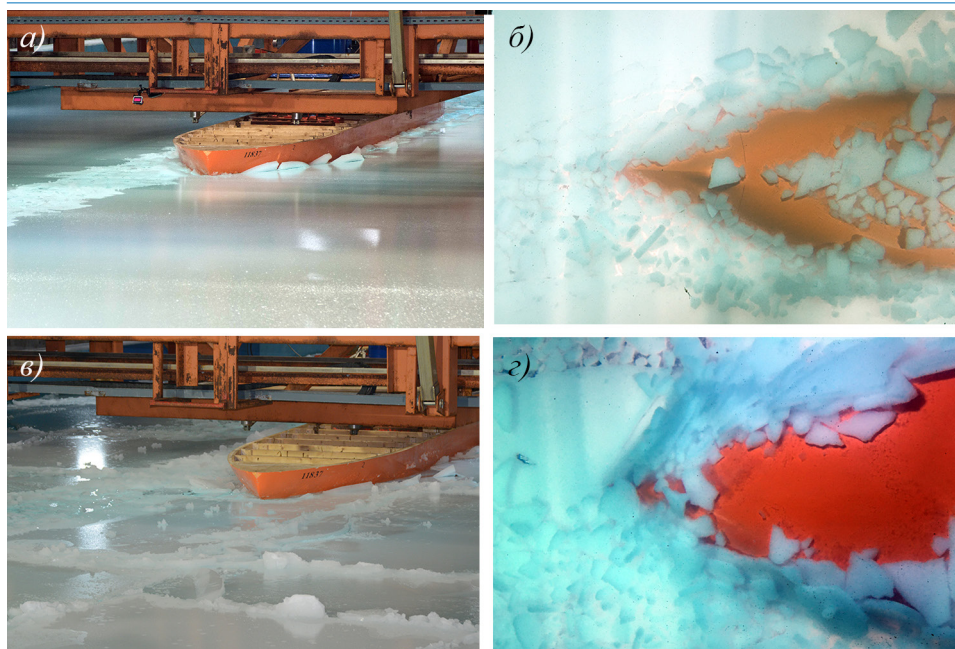


Рис. 3. Испытания модели крупнотоннажного судна, движущегося в канале углом дрейфа 3° . Верхний ряд — взаимодействие со сплошным льдом, нижний ряд — со сплоченным крупнобитым льдом. а, в — вид сверху; б, з — вид из-под воды

Fig. 3. Ice model tests of large-size vessel moving in a channel with a drift angle of 3 degrees. The upper row — moving in level ice, the lower row — moving in compressed ice floes. а, в — top view; б, з — view from bottom windows

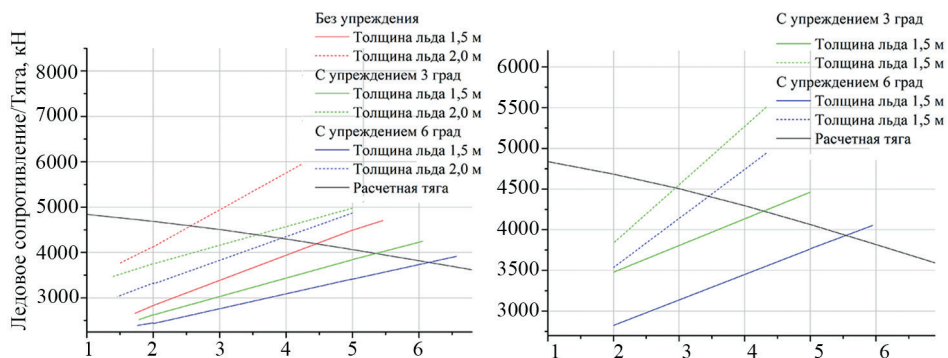


Рис. 4. Ледовое сопротивление крупнотоннажного судна, движущегося по каналу с углом дрейфа 3° : а — канал в ровном льду; б — канал в сплоченном крупнобитом льду

Fig. 4. Ice resistance of large-size vessel moving in a channel with a drift angle of 3 degrees: а — channel in level ice; б — channel in compressed ice floes

ющего по каналу льда не только повышает безопасность мореплавания, но и демонстрирует лучшие показатели ледовой ходкости. Математическая модель движения крупнотоннажного судна по каналу в условиях дрейфа льда приведена в работе [13].

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЛЕДОВОЙ НАГРУЗКИ НА ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ ОБСКОЙ ГУБЫ

Основная масса модельных исследований, выполненных в ледовом бассейне КГНЦ, была посвящена изучению ледовой нагрузки на инженерные сооружения, расположенные в Обской губе. Эти исследования можно разделить на три большие группы.

Моделирование воздействия льда на морские сооружения

К первой группе отнесены исследования взаимодействия отдельно стоящих инженерных сооружений со льдом. Характерным примером таких работ является изучение ледовой нагрузки на гидротехническое сооружение, предназначенное для размещения системы мониторинга гидрометеорологических факторов. Оно призвано обеспечить безопасность мореплавания в границах Морского канала и на подходах к нему. Другим примером является терминал для отгрузки нефти в районе мыса Каменный. Указанные объекты в районе взаимодействия со льдом имеют форму усеченного конуса с вершиной, направленной вверх. Довольно важным результатом этих исследований стало измерение опрокидывающего момента от воздействия сплошного ровного льда, позволившее внести уточнения в расчеты устойчивости сооружения на грунте. При этом методика проведения подобных исследований является стандартной и подробно описана в литературе [4].

Наибольший объем экспериментов в этой группе был выполнен в обеспечение проектов обустройства месторождения «Каменномыское-море». Это морское месторождение расположено на малой глубине (6,0–15,0 м), которая сочетается с тяжелыми ледовыми условиями (толщина льда — до 2,5–3,0 м) и значительными колебаниями уровня воды [14]. Для добычи на этом месторождении ведется строительство ледостойкой стационарной платформы и проектируются три блок-кондуктора. Программой испытаний было предусмотрено изучение воздействия сплошного ледяного покрова, крупнобитого льда, а также торосистых образований.

На рис. 5 представлены фотографии, демонстрирующие некоторые моменты выполненных экспериментов. В ходе модельных испытаний помимо измерения ледовых сил и моментов особое внимание уделялось наблюдениям за образованием ледяных нагромождений перед объектами. Они формируются в условиях мелководья и могут препятствовать безопасному функционированию объекта. Особую опасность

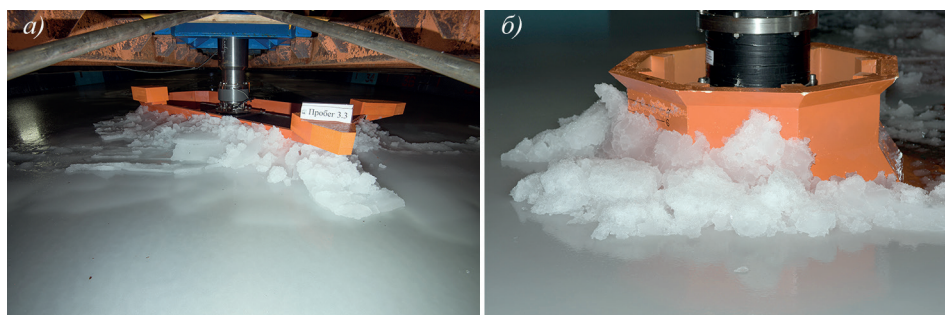


Рис. 5. Модельные исследования взаимодействия ледостойкой платформы с торосистым образованием (а) и блок-кондуктора с ровным льдом (б)

Fig. 5. Ice model tests of an ice-resistant marine structure interacting with an ice ridge (a) and a conductor with level ice (b)

представляет наполнение льда на поверхность сооружений. Результатами исследований стали предложения об оптимизации формы каждого из них, позволившие нивелировать вероятность возникновения таких явлений.

Моделирование воздействия льда на судно при отгрузке возле терминала

Вторая группа исследований была связана с изучением характера взаимодействия со льдом инженерного сооружения и пришвартованного к нему судна. Так, для Новопортовского терминала были выполнены измерения натяжения в швартовном тросе в условиях изменения направления дрейфа льда на 10° . В работе [15] быстрое изменение направления дрейфа льда относится к опасным ледовым явлениям. В специально поставленном опыте измерялись усилия в швартовых в момент изменения судном своего положения из-за смены направления дрейфа. Как показали модельные испытания, максимальные нагрузки на швартовный трос возникли именно в этой ситуации. Характерный пример измерений величины натяжения швартовного троса представлен на рис. 6.

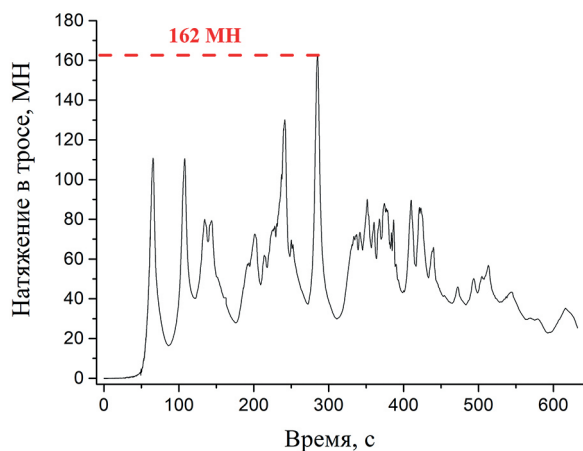


Рис. 6. Взаимодействие «танкер–терминал» со льдом при изменении направления его дрейфа на 10°

Fig. 6. Interaction of oil tanker and oil rig with the ice when the direction of its drift is changed by 10 degrees

Экспериментальные исследования показали, что вследствие воздействия значительной боковой нагрузки на корпус судна со стороны ледяного покрова ему не удастся сразу занять новое положение в канале, остающемся позади терминала. Поэтому носовая часть судна пересекает канал и начинает подламывать кромку ледяного поля. В этот момент нагрузка на швартовный трос начинает значительно возрастать и в определенный момент достигает своего максимального значения. По ходу взаимодействия с ледяным покровом судно скалывает значительные обломки льда в канал терминала и постепенно занимает положение, при котором его диаметральной плоскостью оказывается параллельна направлению дрейфа.

Моделирование воздействия льда на гидротехнические сооружения

Третья группа работ заключалась в исследованиях ледовой нагрузки на различные портовые сооружения. Особенности этих исследований подробно описаны в работах [16, 17]. В них представлены результаты модельных испытаний, относя-

щиеся к изучению воздействия льда на протяженные гидротехнические сооружения с вертикальной стенкой и откосные с наклонной гранью. Подробно представлены новые технологии проведения подобных экспериментов. Выполненные исследования убедительно доказали, что для сооружений с вертикальной гранью и наклонной стенкой большое влияние на уровень ледовой нагрузки оказывают процессы формирования ледяных нагромождений перед сооружениями. Данный вывод стал предпосылкой к разработке теории формирования таких нагромождений, позволяющей создать расчетные схемы для определения ледовой нагрузки и геометрических характеристик нагромождения, а также для оценки вероятности попадания льда в рабочие зоны инженерных сооружений.

НЕКОТОРЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ ОБ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ВЫПОЛНЕННЫХ РАБОТ

Целью физического моделирования в ледовых бассейнах является получение информации о ледовых силах и моментах, действующих на различные технические объекты. Обычно предполагается, что при проведении модельного эксперимента должны моделироваться ледовые условия. Разнообразие различных ледовых условий очень велико, и все они не могут быть воспроизведены в ледовом бассейне. Поэтому при проведении экспериментов моделируют некоторые стандартные «эталонные» ледовые условия, к которым в настоящее время относят сплошной ровный лед (припай), мелко- и крупнобитый лед, ледяные каналы, заполненные тертым льдом, торосистую гряду [4]. Иногда в ледовых бассейнах имитируют ледовые сжатия [4]. Выбор тех или иных эталонных условий осуществляется на основе описания реальных ледовых условий в районе расположения инженерного сооружения. Далее в этом разделе статьи речь пойдет именно о назначении ледовых условий при изучении воздействия льда на инженерные сооружения, т. к. выбор характеристик льда при исследовании ледовой ходкости судов является уже вполне устоявшейся процедурой.

Помимо описания ледовых условий для моделирования необходимо иметь данные о прочностных свойствах льда. Эти свойства, уменьшенные в масштаб модели раз, должны воспроизводиться при моделировании.

Как правило, выбор ледовых условий осуществляется на основе технической документации по результатам инженерно-гидрометеорологических изысканий, предоставляемой проектной организацией. Довольно часто информации о гидрометеорологическом режиме акватории оказывается недостаточно для получения расчетных характеристик ледовых условий. Согласно требованиям нормативного документа СП 47.13330.2016, п. 7.1.14, «Продолжительность наблюдений на акватории морей, когда отсутствуют долговременные наблюдения, должна составлять не менее 3–5 лет (до начала проектирования) в зависимости от сложности гидрометеорологического режима» [18]. Зачастую данные таких наблюдений отсутствуют. При этом в тех случаях, когда период наблюдений приходится ограничивать меньшим сроком, заказчику приходится брать на себя ответственность за возможные последствия использования при проведении метеорологических расчетов результатов эпизодических или кратковременных наблюдений. Все вышесказанное приводит к ситуации, когда для выявления наиболее опасных сценариев воздействия ледяных образований на гидротехнические сооружения закладываются имеющиеся характеристики льда, которые, как правило, являются максимальными за весь период наблюдений и определены с заданной обеспеченностью. Комбинирование таких параметров льда при

выполнении физического моделирования или расчетов ледовой нагрузки ведет к искажению данных о реальной ледовой обстановке.

Проиллюстрируем вышесказанное на примере, который относится к работам, связанным с освоением месторождения «Каменномысское-море» в Обской губе. На основе оценки ледовых условий для данной акватории были сформулированы наиболее опасные сценарии развития ледовой обстановки в районе месторождения [14]:

1) взаимодействие с дрейфующими ледяными полями ровного и торосистого льда в осенне-зимний период перед становлением припая;

2) взаимодействие с неокрепшим припаем в начале зимнего периода, когда еще возможны его взлом и подвижки;

3) взаимодействие с установившимся (неподвижным) припаем в зимний период (в январе–мае);

4) взаимодействие с припаем в весенний период перед его взломом;

5) взаимодействие с дрейфующими ледяными полями, образующимися в весенне-летний период после взлома припая.

Анализ указанных условий показал, что в «качестве основного сценария, определяющего проектный уровень глобальных ледовых нагрузок, принято взаимодействие платформы с торосистым льдом в осенне-зимний период перед становлением припая» [14, с. 35]. Очевидно, что речь идет о вновь образовавшихся торосах, у которых практически отсутствует консолидированный слой. Также очевидно, что важную роль при определении глобальной ледовой нагрузки на сооружения будут играть данные о геометрических характеристиках торосов и скорости их дрейфа.

Приведем теперь данные о ледовых условиях, на основании которых в ледовом бассейне проводились модельные испытания. Всего на различных стадиях проектирования было выполнено три группы экспериментальных исследований с различными ледовыми условиями. Основные характеристики льда, смоделированные в ходе указанных модельных испытаний, приведены в таблице.

Таблица

Варианты ледовых условий для месторождения «Каменномысское-море»

Table

Ice conditions options for the Kamennomysskoye-more gas field			
Наименование характеристики	Вариант задания		
	1	2	3
Толщина ровного льда, м	1,670 и 2,350	2,56	—
Прочность ровного льда на изгиб, кПа	780	700	—
Прочность ровного льда на смятие, кПа	2270	2600	—
Толщина консолидированного слоя тороса, м	2,35	4,00	2,54*
Прочность консолидированного слоя тороса на изгиб, кПа	—	700	670,0
Прочность консолидированного слоя тороса на сжатие, кПа	—	2100	1 050
Глубина киля тороса, м	6,00	5,50	5,04*
Ширина киля тороса, м	—	32,0	70
Скорости дрейфа льда, м/с	0,15 и 1,00	0,15 и 0,79	0,15 и 0,81

Примечание. * — обеспеченностью 1 % при протяженности 70 м в мае–июне.

Note. * — the probability of occurring is 1 % for ridge with width 70 m, the time period is May–June

Анализ данных, приведенных в таблице, позволяет предположить, что в формулировке первого варианта ледовых условий на ранней стадии проектирования еще не сложилось окончательное представление о наиболее опасном сценарии воздействия льда на сооружение. Об этом, например, свидетельствуют выбранные для моделирования значения толщины ровного льда. В дальнейшем в качестве основного сценария, очевидно, был выбран сценарий 5 (взаимодействие с дрейфующими ледяными полями, образующимися в весенне-летний период после взлома припая).

В приведенной таблице хорошо видно, что по некоторым характеристиками имеются существенные расхождения. В первую очередь это касается характеристик торосов, а именно толщины консолидированного слоя. Расхождение в этой величине составляет примерно 1,6–1,7 раз, что довольно чувствительно для величины ледовых нагрузок.

Необходимо отметить еще одну особенность определения характеристик торосов для моделирования. В третьем варианте условий указывается, что величины толщины консолидированного слоя тороса и глубины его кия характерны для мая–июня и соответствуют ежегодной вероятности его превышения в соответствии с классом сооружения. Таким образом, при моделировании в ледовом бассейне воссоздается торос, у которого и глубина кия, и толщина консолидированного слоя соответствуют указанным величинам. Спрашивается: «Какова будет обеспеченность появления такого тороса с комбинацией параметров, каждый из которых определен независимо для заданной классом сооружения обеспеченности?» При выборе для моделирования каждой характеристики ледяного образования, рассчитанной независимо от другой для заданного периода обеспеченности, в опытовом бассейне воссоздаются практически не существующие природные объекты, о которых заранее можно сказать, что их моделирование приведет к завышению ледовой нагрузки.

Еще одной особенностью подбора исходных данных для моделирования является определение скорости дрейфа льда. Как правило, результаты гидрометеорологических изысканий содержат в себе лишь абсолютное значение этой скорости, в большинстве случаев соответствующее заданному направлению дрейфа льда. Но при моделировании гидротехнических сооружений, особенно тех, что расположены вблизи берега, помимо скорости дрейфа льда и его направления, очень важна продолжительность ледового воздействия. Она определяет не только уровень ледовой нагрузки, но и объем ледяных нагромождений, которые могут возникать вблизи сооружения. К сожалению, подобные исходные данные для моделирования редко предоставляются.

Для того чтобы устранить указанные затруднения, при проведении полевых исследований ледяного покрова необходимо учитывать ранее разработанный сценарий ледового воздействия на проектируемый инженерный объект. Результаты полевых исследований или расчетные значения характеристик должны соответствовать выбранному сценарию. Определяя ту или иную характеристику льда с заданным уровнем обеспеченности, важно знать, какими характеристиками в этом случае может обладать сам природный объект.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрены работы ледового бассейна КГНЦ, направленные на обеспечение проектирования, создания и функционирования технических объектов освоения Обской губы. Приведенные примеры убедительно показывают, что метод физического моделирования ледовой нагрузки на различные инженерные сооружения

является весьма эффективным. До сих пор, несмотря на развитие вычислительной техники и методов математического моделирования, модельный эксперимент является практически единственным способом получения необходимой для проектантов и эксплуатационников информации.

По результатам выполненных работ отмечено, что каждый сценарий моделирования должен содержать в себе максимальное значение лишь одного основного параметра льда, обеспеченность которого соответствует классу сооружения. К ряду основных параметров можно отнести толщину ледяного покрова, прочность на изгиб или сжатие, в зависимости от характера разрушения льда объектом исследований, и скорость дрейфа. Таким образом, для физического моделирования характеристики льда должны быть подобраны в соответствии с рассматриваемым основным параметром. Такой подход увеличивает количество моделируемых сценариев, но при этом позволяет воспроизвести в опытовом бассейне реальные ледовые условия и в ряде случаев снизить уровень ледовых нагрузок за счет того, что не рассматривается только один сценарий, являющийся комбинацией независимого расчета обеспеченных характеристик льда за весь период наблюдений.

Конфликт интересов. У авторов нет конфликта интересов.

Competing interests. The authors have no competing interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Денисов В.И., Сазонов К.Е., Тимофеев О.Я. Новые экспериментальные возможности Крыловского государственного научного центра по изучению ледовых воздействий на объекты морской техники // Арктика: экология и экономика. 2015. № 3 (19). С. 76–81.
2. Сазонов К.Е. Тертый лед — рукотворная проблема морской ледотехники // Природа. 2022. № 3 (1279). С. 15–26.
3. Сазонов К.Е. Движение судов в тертых льдах: результаты исследований // Проблемы Арктики и Антарктики. 2021. Т. 67. № 4. С. 406–424. doi:10.30758/0555-2648-2021-67-4-406-424.
4. Сазонов К.Е. Модельный и натурный эксперимент в морской ледотехнике. СПб.: Крыловский государственный научный центр, 2021. 306 с.
5. Сазонов К.Е., Добродеев А.А. Ледовая ходкость крупнотоннажных судов. СПб.: Крыловский государственный научный центр, 2017. 122 с.
6. Coche E., Kalinin A. Yamal LNG: Challenges of an LNG port in Arctic // Proceedings of the 22nd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. June 9–13, 2013. Espoo, Finland. 11 p. URL: https://www.poac.com/Papers/2013/pdf/POAC13_172.pdf (дата обращения: 15.03.2023).
7. Riska K., Blouquin R., Coche E., Shumovskiy S., Boreysha D. Modeling brash ice growth in ports // 22nd IAHR International Symposium on Ice (Singapore, August 11 to 15, 2014). Singapore, 2014. С. 853–859.
8. Андреев О.М., Гудошникова Ю.П., Виноградов Р.А., Клячкин С.В. Ледовые каналы как лимитирующий фактор при проектировании терминалов отгрузки углеводородов в прибрежной зоне арктических морей // Вести газовой науки. 2019. № 2 (39). С. 46–52.
9. Виноградов Р.А., Андреев О.М., Драбенко Д.В., Скутин А.А. Инженерно-гидрометеорологические изыскания с учетом аккумуляции ледяной каши в арктических портах. Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации // Материалы 16-ой общероссийской научно-практической конференции изыскательских организаций. М., 2021. С. 277–284.

10. ITTC — Recommended Procedures and Guidelines. Guidelines for Modelling of Complex Ice Environments. 7.5-02-04-03. 2021. 15 p. URL: <https://www.ittc.info/media/9661/75-02-04-03.pdf> (дата обращения: 15.03.2023).
11. Казаков А.Т. Безопасная дистанция и выбор оптимальной скорости при ледокольной проводке: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л., 1986, 24 с.
12. Сазонов К.Е. Теоретические основы плавления судов во льдах. СПб.: ЦНИИ им. академика А.Н. Крылова, 2010. 274 с.
13. Добродеев А.А., Сазонов К.Е. Движение крупнотоннажных судов при дрейфе льда // Арктика: экология и экономика. 2020. № 2 (38). С. 68–76. doi: 10.25283/2223-4594-2020-2-68-76.
14. Благовидова И.Л., Тертышников А.С. Оценка глобальных ледовых нагрузок на ледостойкую стационарную платформу на месторождении Каменномысское-море // Морской вестник. 2020. № 1 (14). С. 34–37.
15. Опасные ледовые явления для судоходства в Арктике / Под. ред. д-ра геогр. наук Е.У. Миронова. СПб.: ААНИИ, 2010. 320 с.
16. Добродеев А.А., Сазонов К.Е. Физическое моделирование ледовой нагрузки на протяженные гидротехнические сооружения. Сооружения с вертикальной стенкой // Арктика: экология и экономика. 2020. № 4 (40). С. 77–89. doi: 10.25283/2223-4594-2020-4-77-89.
17. Добродеев А.А., Сазонов К.Е. Физическое моделирование ледовой нагрузки на протяженные гидротехнические сооружения. Откосные сооружения с наклонной гранью // Арктика: экология и экономика. 2021. Т. 11. № 1. С. 90–100. doi: 10.25283/2223-4594-2021-1-90-100.
18. СП 47.13330.2016. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456045544> (дата обращения: 15.03.2023).

REFERENCES

1. Denisov V.I., Sazonov K. E., Timofeev O. Ya. New experimental possibilities of Krylov State research Centre in ice interaction with marine structures researching. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. Arctic: ecology and economics. 2015, 3 (19): 76–81. [In Russian].
2. Sazonov K.E. Brash ice — a man-made problem of marine ice engineering. *Priroda*. Nature. 2022. 3 (1279): 15–26. doi:10.7868/S0032874X22030024. [In Russian].
3. Sazonov K.E. Ship operation in brash ice: results of investigations. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2021, 67 (4): 406–424. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-4-406-424>. [In Russian].
4. Sazonov K.E. *Modelnii i naturanii eksperiment v morskoi ledotehnike*. Model and full-scale experiment in marine ice engineering. St. Petersburg: Krylov State Research Centre, 2021: 306 p. [In Russian].
5. Sazonov K.E., Dobrodeev A.A. *Ledovaya hodkost krupnotonnajnih sudov*. Ice performance of large-size vessels. St. Petersburg: Krylov State Research Centre: 2017: 122 p. [In Russian].
6. Coche E., Kalinin A. Yamal LNG: Challenges of an LNG port in Arctic. Proceedings of the 22nd International conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. June 9–13, 2013. Espoo, Finland. 11 p. Available at: https://www.poac.com/Papers/2013/pdf/POAC13_172.pdf (accessed 15.03.2023).
7. Riska K., Blouquin R., Coche E., Shumovskiy S., Boreysha D. Modeling brash ice growth in ports. 22nd IAHR International Symposium on Ice. Singapore, August 11–15, 2014. Singapore, 2014: 853–859.
8. Andreev O.M., Gudoshnikov Yu.P., Vinogradov R.A., Klyachkin S.V. Ice channels as a limiting factor in the design of terminals for the shipment of hydrocarbons in the coastal zone of the Arctic seas. *Vesti Gazovoy Nauki*. News of gas science. 2019, 2 (39): 46–52. [In Russian].

9. Vinogradov R.A., Andreev O.M., Drabenko D.V., Skutin A.A. Engineering and hydrometeorological surveys taking into account the accumulation of ice porridge in Arctic ports. Prospects for the development of engineering surveys in construction in the Russian Federation. Materials of the 16th all-Russian scientific-practical conference of survey organizations. Moscow, 2021: 277–284. [In Russian].
10. ITTC — Recommended Procedures and Guidelines. Guidelines for Modelling of Complex Ice Environments. 7.5-02-04-03. 2021. 15 p. Available at: <https://www.ittc.info/media/9661/75-02-04-03.pdf> (accessed 15.03.2023).
11. Kazakov A.T. Safe distance and the choice of the optimal speed for icebreaking assistance. Aut. diss. for the competition uch. step. cand. tech. sciences. Leningrad, 1986: 24 p. [In Russian].
12. Sazonov K.E. *Teoreticheskie osnovy plavaniya sudov vo ldah*. Theoretical foundations of ship navigation in ice. St. Petersburg: Central Research Institute academician A.N. Krylova, 2010: 274 p. [In Russian].
13. Dobrodeev A.A., Sazonov K.E. Motion of heavy-tonnage vessels in the ice drift conditions. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. Arctic: ecology and economics. 2020, 2 (38): 68–76. doi: 10.25283/2223-4594-2020-2-68-76. [In Russian].
14. Blagovidova I.L., Tertyshnikova A.S. Assessment of global ice loads on an ice-resistant fixed platform at the Kamennomysskoye-Sea field. *Morskoy Vestnik*. Sea Herald. 2020, 1 (14): 34–37. [In Russian].
15. *Opasnie ledovie yavleniya dlya sudohodstva v Arktike*. Dangerous ice phenomena for shipping in the Arctic. St. Petersburg: AARI, 2010: 320 p. [In Russian].
16. Dobrodeev A.A., Sazonov K.E. Physical modeling of ice load on extended hydraulic constructions. The vertical wall constructions. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. Arctic: ecology and economics. 2020, 4 (40): 77–89. doi: 10.25283/2223-4594-2020-4-77-89. [In Russian].
17. Dobrodeev A.A., Sazonov K.E. Physical modeling of ice load on extended hydraulic constructions. Sloping constructions with an inclined edge. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. Arctic: ecology and economics. 2021, 11 (1): 90–100. doi: 10.25283/2223-4594-2021-1-90-100. [In Russian].
18. SP 47.13330.2016. *Injenernie iziskaniya dlya stroitelstva. Osnovnie polojeniya*. Engineering surveys for construction. Basic provisions. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/456045544> (accessed 15.03.2023). [In Russian].

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ ЖУРНАЛА «ПРОБЛЕМЫ АРКТИКИ И АНТАРКТИКИ»

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

Все материалы направляются в редакцию в электронном виде он-лайн через личный электронный кабинет автора на сайте журнала <https://www.aaresearch.science>. Авторы должны представить текст статьи со вставленными рисунками, а также отдельно оригинальные файлы рисунков (см. требования к рисункам), Акт экспертизы о возможности публикации статьи в открытой печати и файл с полными сведениями об авторах: фамилия, имя и отчество (полностью), место работы (полный адрес), ученая степень, должность, адрес электронной почты и телефон одного из авторов для связи. Рекомендуемый объем статей — от 8 до 20 страниц текста (через 1,5 интервала), включая таблицы и список литературы; рисунков не более 6, таблиц не более 6. Текст набирается в формате Microsoft Word. Параметры набора: шрифт Times New Roman, кегль 12, интервал 1,5. Страницы в статье нумеруются.

Все поступающие материалы проходят проверку на отсутствие заимствований в соответствии с этическими правилами публикаций.

Все статьи проходят двойное рецензирование.

Публикация в нашем журнале полностью бесплатна.

Структура статьи

Статьи оформляются следующим образом. Сначала дается УДК; затем на русском языке — название статьи, инициалы и фамилии всех авторов (при указании авторов статьи сначала идут инициалы, затем фамилия. Инициалы и фамилия разделяются пробелом), полное название организации(ций), где выполнена работа и ее (их) адрес; электронный адрес автора, ответственного за связь с редакцией. Затем те же сведения приводятся на английском языке: заглавие, авторы, учреждения, второй раз e-mail главного автора. При этом имена авторов даются полностью, отчество сокращенно. После этого на английском языке пишутся ключевые слова в соответствии с английским алфавитом (не более 10 слов и не более двух слов в сочетаниях) и авторское Summary статьи на 20–25 строк (здесь же для контроля обязательно прилагается перевод Summary на русский язык).

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

Summary должно быть понятно без обращения к самой публикации как независимый от статьи источник информации. Оно должно отвечать следующим критериям: информативности (не содержать общих слов); содержательности (отражать основное содержание статьи: задачи работы, методы, главные результаты исследований); последовательности изложения. Перевод Summary на английский язык должен быть выполнен качественно, с использованием англоязычной специальной терминологии, не быть дословным переводом русскоязычной версии (при необходимости следует также включать пояснения для иностранного читателя, связанные со спецификой исследований).

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

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

Для статьи, представляемой на английском языке, требуются: УДК; перевод на русский язык всей информации, которая дается перед началом статьи в журнале. Кроме того, в конце статьи необходимо привести расширенный русский реферат (1–1,5 стр.), а в подписях к рисункам дать их перевод на русский язык.

Основной текст разбивается на разделы. Обычно это введение, постановка проблемы, методика исследований, результаты исследований, обсуждение результатов, заключение (выводы). В конце статьи нужно поместить следующую информацию на двух языках: Конфликт интересов/Competing interests; Финансирование/Funding; Благодарности/Acknowledgments. Желательно также указать вклад авторов в работы — Вклад авторов/Authors contribution. В разделе Финансирование необходимо указать источник финансовой поддержки, способствовавший выполнению этой работы (гранты фондов, программы и т.д.), в Благодарностях можно поместить благодарность лицам, оказавшим помощь в подготовке статьи.

Подписи под рисунками даются к каждому рисунку в соответствии с его расположением в тексте: сначала на русском (Рис. 1. Далее подпись), а потом на английском языке (Fig. 1. Figure caption). В подписях необходимо отделять собственно название рисунка от объяснений к нему (экспликация), которые надо давать с новой строки.

Рисунки и фотографии помещают в отдельных файлах: для растровых изображений в растровых форматах JPEG/TIFF/PNG/PSD, в векторных — CDR, AI, EPS и в формате XLS (не допускаются рисунки в формате Word). Разрешение растровых изображений в оттенках серого и RGB-цвет должно быть 300 dpi. Все словесные надписи на рисунках даются только на русском языке. Все условные знаки обозначаются цифрами (курсивом) с обязательной расшифровкой в подрисуночных подписях, где они также обозначаются курсивом. Цифры можно ставить и на линиях графиков. На графиках все шкалы обязательно подписываются и указывается размерность величин.

Таблицы. Для больших таблиц следует использовать альбомную разметку страницы. Номер и наименование таблицы (два отдельных абзаца) приводятся на русском и английском языках. Заголовок таблицы не должен превышать ДВУХ строк.

Таблицы и графы должны иметь заголовки, сокращения слов в таблицах не допускаются. Таблицы набираются, как и текст, в формате Word шрифтом 9 пт. Если у таблицы есть примечание, оно тоже приводится на двух языках. Примечания внутри таблицы не даются. Используются сноски ко всей таблице или отдельным ее показателям.

В тексте следует давать ссылки на все рисунки и таблицы. При первой ссылке — рис. 1, табл. 1; при повторных — см. рис.1, см. табл. 1. Если в тексте дается одна таблица или один рисунок, то ссылки в тексте приводятся следующим образом: при первой ссылке — (таблица), (рисунок); при повторной ссылке — (см. таблицу), (см. рисунок).

Математические обозначения, символы и простые формулы рекомендуется набирать основным шрифтом статьи, сложные формулы — в программе MathType (или в версиях Word до 2007 года включительно). Нумеруются только те формулы, на которые есть ссылки в тексте. Русские и греческие буквы в формулах и тексте, а также химические элементы набираются прямым шрифтом, латинские буквы — курсивом. Аббревиатуры в тексте, кроме общепринятых, не допускаются.

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

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

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

Статьи, не соответствующие указанным требованиям, рассматриваться не будут. При работе над рукописью редакция по согласованию с автором вправе ее сократить. Автор, подписывая статью и направляя ее в редакцию, тем самым передает авторские права на издание этой статьи журналу «Проблемы Арктики и Антарктики/ Arctic and Antarctic Research».

Редакционная коллегия не вступает в дискуссии с авторами по поводу принимаемых ею решений.

Более полные сведения по оформлению статьи приведены в документе «Требования к оформлению статей, присылаемых в журнал Проблемы Арктики и Антарктики», который обязателен для ознакомления при подготовке материалов статьи.

Об Аннотациях. Редакция рекомендует всем авторам ознакомиться с Рекомендациями по оформлению аннотаций на английском языке, которые являются для иностранных ученых и специалистов основным и, как правило, единственным источником информации о содержании статьи и изложенных в ней результатах исследований.